

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Радіотехнічний факультет  
Кафедра радіотехнічних систем**

«На правах рукопису»  
УДК 621.396.96

До захисту допущено:

В.о.завідувача кафедри  
\_\_\_\_\_ Сергій ЖУК

«   » \_\_\_\_\_ 2021 р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

**за освітньо-професійною програмою**

**«Радіотехнічні інформаційні технології»**

**зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»**

**на тему: «Алгоритм локального позиціонування об'єкта на основі технології  
Bluetooth beacon»**

Виконав (-ла):  
студент (-ка) II курсу, групи РТ-01мп  
Косоць Іван Андрійович




Керівник:  
Ст. викладач, к.т.н.  
Товкач Ігор Олегович



Рецензент:  
Ст.викладач, к.т.н.  
Адаменко Володимир Олексійович

\_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних  
посилань.

Студент (-ка)  \_\_\_\_\_

Київ – 2021 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

**Радіотехнічний факультет**

**Кафедра радіотехнічних систем**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Радіотехнічні інформаційні технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ Сергій ЖУК

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**  
**Косовцю Івану Андрійовичу**

1. Тема дисертації: «Алгоритм локального позиціонування об'єкта на основі технології Bluetooth beacon»,

науковий керівник дисертації Товкач Ігор Олегович, к.т.н., ст. викладач.,

затверджені наказом по університету від «\_\_ 15\_\_» листопада 2021 р.  
№ 3744-с

2. Термін подання студентом дисертації 15 грудня 2021 року.

3. Об'єкт дослідження Процес локального позиціонування об'єкта в приміщенні на основі технології Bluetooth beacon

4. Вихідні дані Методи позиціонування, Bluetooth маячки(beacon), програмне середовище MATLAB, Node.js+JavaScript

5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1 Аналіз та порівняння існуючих рішень локального позиціонування. 2 Аналіз та порівняння методів визначення місцеположення. 3 Розробка алгоритму локального позиціонування об'єкта на основі технології Bluetooth beacon. 4 Аналіз

розробленого алгоритму. 5 Експериментальне дослідження розробленого алгоритму

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу \_\_\_\_\_  
Мультимедійна презентація

7. Орієнтовний перелік публікацій \_\_1 публікація на конференції РТПСАС

8. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 1 вересня 2021 \_\_\_\_\_.

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Отримання завдання	1.09.2021	
2	Збір інформації	7.09.2021	
3	Аналіз існуючих рішень та засобів позиціонування	7.10.2021	
4	Розробка алгоритму локального позиціонування об'єкта на основі технології Bluetooth beacon	10.11.2021	
5	Аналіз розробленого алгоритму	17.11.2021	
6	Експериментальне дослідження розробленого алгоритму	30.11.2021	
7	Оформлення магістерської дисертації	12.12.2021	
8	Отримання допуску до захисту	15.12.2021	

Студент

Науковий керівник



Іван КОСОВЕЦЬ

Ігор ТОВКАЧ

## РЕФЕРАТ

Обсяг пояснювальної записки магістерської дисертації становить 90 сторінок, які включають в себе 5 розділів, 2 додатки, 28 ілюстрацій, 13 таблиць, 40 бібліографічних найменувань за переліком джерел посилань.

**Ключові слова:** Bluetooth beacon, RSS-вимірювання, метод найменших квадратів, визначення місцеположення.

**Актуальність теми дослідження.** Системи позиціонування відіграють та завжди відігравали важливу роль в житті людини, найпоширеніша на даний час система позиціонування це GPS вона здатна забезпечувати точність до одного метру, проте далеко не в усіх місцях. У місті точність знижується до десятків метрів, а у приміщеннях або під землею зовсім не працює. А саме в подібних місцях потрібне позиціонування в таких сферах як: маркетинг, охорона здоров'я, промисловість, транспортна сфера та шахти. Тому розроблюються різні системи локального позиціонування, частина з них потребує дорогого обладнання, інші не забезпечують достатньо велику точність. Серед існуючих систем виділяють ті, що побудовані за технологією Bluetooth beacon, в них для визначення положення об'єкта застосовується RSS вимірювання. Однак точність визначення місцеположення є неприйнятною для позиціонування об'єкта, тому підвищення точності визначення місцеположення в приміщенні є актуальною науковою задачею.

**Мета та завдання.** Підвищення точності локального позиціонування об'єкта на основі технології Bluetooth beacon за рахунок критерію мінімальної прийнятої потужності.

**Об'єкт дослідження.** Процес локального позиціонування об'єкта в приміщенні на основі технології Bluetooth beacon.

**Предмет дослідження.** Методи визначення локального позиціонування об'єкта.

**Методи дослідження.** В роботі використовувалися методи статистичної теорії прийняття рішень, статистичного моделювання на ЕОМ і метод експериментального дослідження.

**Наукова новизна одержаних результатів:** Розробка алгоритму локального позиціонування об'єкта на основі технології Bluetooth beacon з урахуванням критерію мінімальної прийнятої потужності.

**Практичне значення одержаних результатів:**

1. Розроблений алгоритм на основі RSS вимірювань, який використовує критерій мінімальної прийнятої потужності дозволяє зменшити СКВ похибки визначення положення об'єктів більш ніж у 5 разів та майже досягає нижньої границі Рао-Крамера.

2. Запропонований, описаний, та перевірений за допомогою статистичного моделювання та експериментально, критерій мінімально прийнятої потужності для підвищення точності визначення положення об'єкта на основі технології Bluetooth beacon.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертації та основні положення, отримані в роботі, представлялися на: X міжнародній науково-технічній конференції «Радіотехнічні поля, сигнали та системи» (м. Київ, 2021);

**Публікації.** За результатами дисертаційної роботи опубліковано 1 тез доповідей.

## ANNOTATION

The volume of the explanatory note of the master's dissertation is 90 pages, which include 5 sections, 2 appendices, 28 illustrations, 13 tables, 40 bibliographic titles according to the list of reference sources.

**Keywords:** Bluetooth beacon, RSS measurement, least squares method, location.

**Relevance of the research topic.** Positioning systems play and have always played an important role in human life, the most common currently positioning system is GPS, it is able to provide accuracy up to one meter, but not in all places. In the city, the accuracy drops to tens of meters, and indoors or underground does not work. Namely in such places positioning in such spheres as: marketing, public health services, the industry, transport sphere and mines is required. Therefore, various local positioning systems are being developed, some of them require expensive equipment, others do not provide high enough accuracy. Among the existing systems are those built on Bluetooth beacon technology, they use RSS measurement to determine the position of the object. However, the accuracy of the location is unacceptable for the positioning of the object, so improving the accuracy of the location in the room is an urgent scientific task.

**Purpose and objectives.** Improve the accuracy of local positioning of the object based on Bluetooth beacon technology due to the criterion of minimum received power.

**Object of research.** The process of locally positioning an object in a room based on Bluetooth beacon technology.

**Subject of research.** Methods for determining the local positioning of an object.

**Research methods.** The methods of statistical theory of decision making, statistical modeling on a computer and the method of experimental research were used in the work.

**Scientific novelty of the obtained results:** Development of the algorithm of local positioning of the object on the basis of Bluetooth beacon technology taking into account the criterion of the minimum received power.

**Practical significance of the obtained results:**

1. Developed algorithm based on RSS measurements, which uses the criterion of minimum received power allows to reduce SLE errors in determining the position of objects by more than 5 times and almost reaches the lower Rao-Cramer limit.

2. Proposed, described, and tested by statistical modeling and experimentally, the criterion of the minimum accepted power to increase the accuracy of determining the position of the object based on Bluetooth beacon technology.

**Approbation of dissertation results.** The materials of the dissertation and the main provisions obtained in the work were presented at: X International Scientific and Technical Conference "Radio Engineering Fields, Signals and Systems" (Kyiv, 2021;

**Publications.** According to the results of the dissertation 1 abstracts were published.

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**  
**до магістерської дисертації**

на тему: Алгоритм локального позиціонування об'єкта на основі технології  
Bluetooth beacon

Київ — 2021 року



## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	12
ВСТУП.....	13
Розділ 1 Існуючі засоби вирішення проблеми.....	15
1.1 Огляд класичних методів визначення координат.....	15
1.1.1 Астрономо-геодезичні.....	15
1.1.2 Інерційні.....	16
1.1.3 Фотограмметричні.....	17
1.2 Глобальні системи позиціонування(GPS).....	18
1.3 Локальні системи позиціонування(LPS).....	20
1.3.1 QR-коди.....	20
1.3.2 Магнітне поле.....	20
1.3.3 Світлодіодні лампи.....	21
1.3.4 Інерційні системи.....	22
1.3.5 Бездротові мережі.....	23
1.4 Методи визначення дальності в бездротових мережах.....	24
1.4.1 Метод Angle of Arrival (AoA).....	24
1.4.2 Метод Time of Arrival (ToA).....	26
1.4.3 Метод Time Difference of Arrival (TDoA).....	27
1.4.4 Метод Received-Signal Strength (RSS).....	28
1.5 Технології позиціонування в бездротових мережах.....	28
1.5.1 Технологія Wi-Fi.....	29
1.5.2 Технологія Bluetooth.....	30
1.5.3 Технологія надширококуткового зв'язку (UWB).....	33

1.5.4	Технологія ZigBee .....	33
1.5.5	Технологія nanoLOC .....	34
1.6	Висновки по розділу .....	35
Розділ 2	Алгоритми та методи визначення положення об'єкта.....	37
2.1	Алгоритми позиціонування .....	37
2.1.1	Найближча точка доступу (Proximity) .....	37
2.1.2	Центроїд (Centroid) .....	38
2.1.3	Ваговий центроїд (Weighted centroid) .....	38
2.1.4	Порівняння із зразком (Fingerprinting) .....	39
2.1.5	Латерація (Lateration) .....	41
2.1.6	Диференціальна латерація (Differential lateration).....	42
2.1.7	Навігаційне числення (Deduced reckoning) .....	44
2.1.8	Алгоритм Handover .....	45
2.2	Методи оцінки координат.....	46
2.2.1	Метод сферичного перетину.....	47
2.2.2	Метод сферичної інтерполяції (метод найменших квадратів) .....	49
2.3	Висновки по розділу .....	50
Розділ 3	Розроблення алгоритму позиціонування об'єкту на основі технології Bluetooth beacon .....	51
3.1	Оцінка координат .....	51
3.2	Моделювання алгоритму .....	53
3.3	Критерій відбору по дальності .....	54
3.4	Висновки по розділу .....	58
Розділ 4	Практична реалізація алгоритмів позиціонування.....	59
4.1	RaspberryPi в якості Bluetooth маяка.....	59

4.2 Виміри .....	61
4.3 Висновки по розділу .....	64
Розділ 5 Розроблення стартап проекту .....	65
5.1 Опис ідеї проекту.....	65
5.2 Технологічний аудит ідеї проекту .....	66
5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	67
5.4 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	69
5.5 Висновки до розділу .....	70
ВИСНОВКИ.....	71
Література .....	73
Додаток А .....	77
Додаток Б.....	87

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ГНСС	Глобальні навігаційні супутникові системи
GPS	Global Positioning System
LED	Light-emitting diode
PDR	Pedestrian Dead Reckoning
AoA	Angle of Arrival
ToA	Time of Arrival
TDoA	Time Difference of Arrival
RSS	Received-Signal Strength
UWB	Ultra-Wide Band
SDSTWR	Symmetrical double-sided two-way ranging
СКВ	середньоквадратичне відхилення

## ВСТУП

Людство здавна цікавили питання «Де я перебуваю?» і «Куди я маю рухатися?». На них, маючи певну підготовку, можна відповісти, використовуючи прикмети ландшафту та застосовуючи компас і мапу. Для збільшення точності місцезнаходження винайдено десятки астрономічних, геодезичних приладів і вдосконалювалися методи лінійно-кутових вимірів [1].

Із запуском першого супутника в ХХ сторіччі започатковано революційну технологію визначення просторових координат методами супутникової геодезії. Створювана для військової мети оперативного та автономного виміру просторових координат, орієнтування і швидкості руху об'єктів, зрештою системи супутникового позиціонування знайшли застосування у вирішенні як наукових, так і побутових завдань.

Однак супутникові методи справляються з задачею позиціонування лише до тих пір, поки не йдеться про місця в яких поширення сигналу обмежене або неможливе, наприклад у приміщенні або під землею. Для вирішення даних задач створюються альтернативні методи [2, 3]. На сьогоднішній день системи локального позиціонування є необхідним в таких сферах як:

- Маркетинг. Цифрові послуги допомагають компаніям оптимізувати процеси, покращувати якість обслуговування клієнтів, спрямовувати їм рекламні акції та рекламну рекламу.
- Охорона здоров'я, де завдяки використанню системи пацієнти можуть легко орієнтуватися біля великих медичних закладів, знаходити потрібні кабінети, отримувати інформацію про час прийому лікаря.
- Промисловість, в якій подібні системи дозволяють оптимізувати виробничі процеси та здійснювати контроль над активами підприємств. Кожен об'єкт, який необхідно відстежувати, забезпечується крихітною

наклейкою з маячком. Положення та характеристики об'єктів можуть відобразитися у веб-інтерфейсі будь-коли.

- Склади, де маяки локальних систем можуть бути прикріплені до цінних та дорогих об'єктів. Коли маячок залишає певну зону, спрацьовує сигнал тривоги або система безпеки отримує повідомлення.
- Транспортна сфера, для якої маяки забезпечують навігацію усередині приміщень для пасажирів авіакомпаній чи залізничних вокзалів. За допомогою програм на пристроях Android та iOS вони можуть легко знайти потрібні шляхи або важливі об'єкти, такі як термінали відправлення, банкомати, кімнати відпочинку та квиткові каси.
- Шахти, в яких спостереження в реальному масштабі часу за людьми та машинами у шахтах допомагає підвищити безпеку людей та може сприяти оптимізації перевезень у довгих тунелях.

В загалом сфера визначення положення та навігації всередині приміщення доволі мало розвинена. В останні роки розробляються різноманітні системи внутрішньої навігації. Незважаючи на різноманіття існуючих систем, позиціонування в приміщенні все ще не задовольняє вимогам високої точності. Оскільки існуючі системи вимагають або дорогої інфраструктури та спеціальних пристроїв або мають низьку точність чи вимагають значних зусиль в обробці даних, вони сильно розрізняються за ефективністю та вартістю

Проте, методи позиціонування в приміщенні, засновані на потужності сигналу Bluetooth маяків, являються достатньо привабливими, оскільки вони достатньо дешеві в побудові інфраструктури, майже не займають місця та працюють від батарейок. Apple та Google розроблюють та продають різновиди маяків для надання послуги позиціонування. Оскільки системи маяків з базовими алгоритмами позиціонування є недостатньо неточними дана робота досліджує існуючі алгоритми та присвячена розробці нового, більш точного алгоритму.

# Розділ 1 Існуючі засоби вирішення проблеми

## 1.1 Огляд класичних методів визначення координат

Незважаючи на появу абсолютно нових підходів до вирішення задачі позиціонування як на глобальному, так і на локальному рівні, всі вони ґрунтуються на класичних методах виміру положення координат точок місцевості. (рис 1.1)

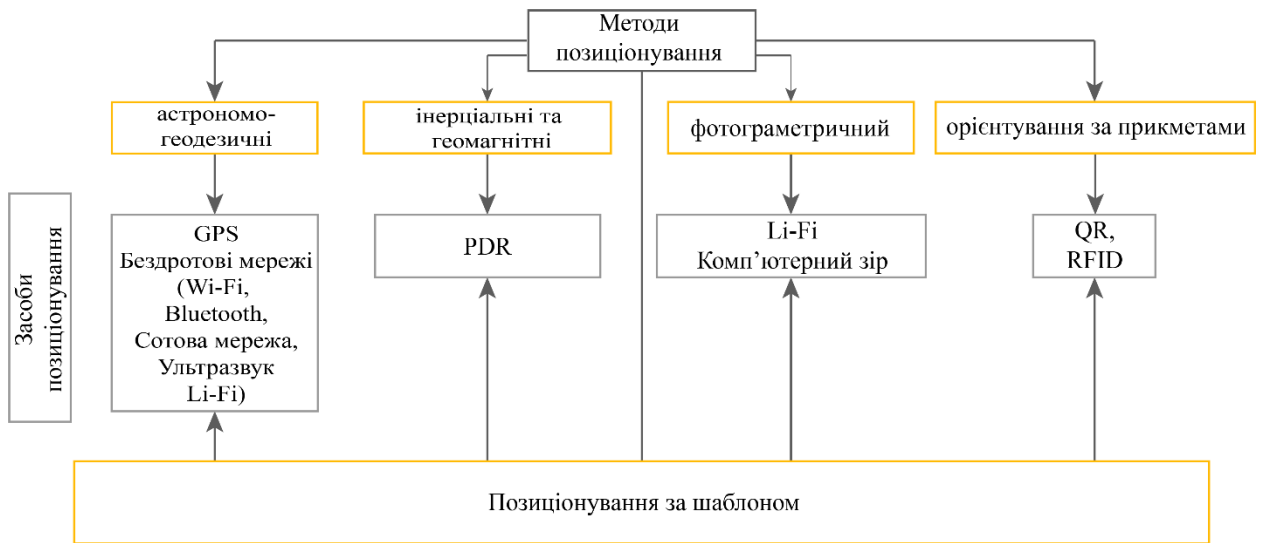


Рисунок 1.1 — Зв'язок методів та засобів позиціонування

### 1.1.1 Астрономо-геодезичні

Класична задача визначення координат об'єкта  $A$ , при відомих координатах станцій  $A_1, A_2 \dots A_N$  і кутах  $\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_m$  вирішується за допомогою кутової засічки за формулами Юнга (пряме завдання) і Гауса (зворотна задача). Щоб відбудувати один трикутник засічки, необхідно мати хоча б два вихідні пункти. Однак зазвичай є декілька трикутників, і в цьому випадку вирішується система рівнянь (1.1).

Традиційно, кутова засічка застосовується в астрономічних спостереженнях положення небесних світил та при побудові геодезичної мережі способом триангуляції.

$$\left\{ \begin{array}{l} X_A = \frac{X_1 \cdot ctg(\alpha_2) + X_2 \cdot ctg(\alpha_1) - Y_1 + Y_2}{ctg(\alpha_1) + ctg(\alpha_2)} \\ Y_A = \frac{Y_1 \cdot ctg(\alpha_2) + Y_2 \cdot ctg(\alpha_1) - X_1 + X_2}{ctg(\alpha_1) + ctg(\alpha_2)} \\ \dots \\ X_A = \frac{X_{n-1} \cdot ctg(\alpha_m) + X_n \cdot ctg(\alpha_{m-1}) - Y_{n-1} + Y_n}{ctg(\alpha_{m-1}) + ctg(\alpha_m)} \\ Y_A = \frac{Y_{n-1} \cdot ctg(\alpha_m) + Y_n \cdot ctg(\alpha_{m-1}) - X_{n-1} + X_n}{ctg(\alpha_{m-1}) + ctg(\alpha_m)} \end{array} \right. \quad (1.1)$$

де  $X_A, Y_A$  – координати що визначаються

Лінійну засічку використовують для обчислення координат об'єкта  $A$ , при відомих координатах станцій  $A_1, A_2 \dots A_N$  та сторонах  $D_1, D_2 \dots D_n$ . Загальний випадок лінійної засічки – просторова лінійна засічка, коли відомі координати вихідних об'єктів в трьох просторах[4]:

$$\left\{ \begin{array}{l} D_1^2 = (X_1 - X_A)^2 + (Y_1 - Y_A)^2 + (Z_1 - Z_A)^2 \\ D_2^2 = (X_2 - X_A)^2 + (Y_2 - Y_A)^2 + (Z_2 - Z_A)^2 \\ \dots \\ D_n^2 = (X_n - X_A)^2 + (Y_n - Y_A)^2 + (Z_n - Z_A)^2 \end{array} \right. \quad (1.2)$$

де  $X_A, Y_A, Z_A$  — координати що визначаються,

$X_i, Y_i, Z_i, i = 1 \dots n$  – відомі координати маяків  $A_i$

Класичний приклад використання лінійної засічки – геодезична трилатерація.

### 1.1.2 Інерційні

Визначення місцезнаходження з використанням інерційних методів полягає у визначенні положення об'єкта що рухається, за лінійними та кутовими складовими його прискорення. Лінійні складові вимірюються за допомогою акселерометрів, кутові – за допомогою гіроскопів. Знаючи початкове положення об'єкта, визначається вектор руху шляхом безперервного інтегрування сукупності диференціальних рівнянь(1.3) [4].



$$x = \int_0^t \left( \int_0^t a_x dt + v_x 0 \right) dt + x_0 \quad (1.3)$$

Основна перевага використання інерційних систем – їх незалежність від зовнішніх джерел: усі виміри проводяться на основі датчиків самої системи. Тому їх можна застосовувати незалежно від середовища (водне або повітряне, закрите або відкрите). Накопичення помилок у таких системах прямо пропорційне часу, що є основною проблематикою застосування. З цієї причини для інерційних систем необхідне періодичне калібрування. Однак, у разі зміни положення за короткий проміжок часу їхня точність стає на порядок вищою. Ця особливість є вирішальною для використання інерційних методів при аерокосмічній зйомці [5].

### 1.1.3 Фотограмметричні

У фотограмметрії розташування точок місцевості можна визначати за фотографіями. В його основі даного методу лежить колінеарна умова, відповідно до якої центр фотографування, точка місцевості та її зображення на фотознімку лежать на одній прямій. Для того, щоб ним скористатися, необхідний пристрій для фіксації зображення, зв'язаний із обчислювальним центром, елементи орієнтування зображення щодо геодезичної системи координат, а також механізм визначення положення точок фотознімка у внутрішній системі координат. Сутність визначення положення точки місцевості за точками фотознімка (Рис. 1.2).

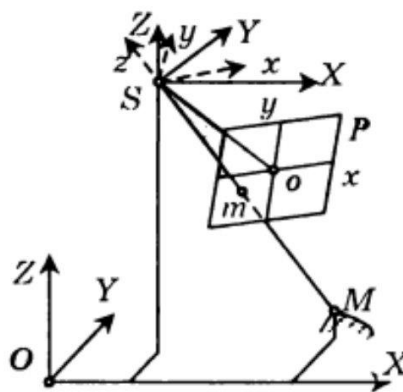


Рисунок 1.2 — Зв'язок координат аерознімка та місцевості[6]

Залежність (1.4) дозволяє зв'язати координати фотографії з координатами точки місцевості, якщо відома її висота[6]:

$$\begin{cases} X_M - X_S = (Z_M - Z_S) \cdot \frac{a_1x + a_2y - a_3z}{c_1x + c_2y - c_3z} \\ Y_M - Y_S = (Z_M - Z_S) \cdot \frac{b_1x + b_2y - b_3z}{c_1x + c_2y - c_3z} \end{cases} \quad (1.4)$$

де  $X_M, Y_M, Z_M$  — координати точки в місцевості,

$x_m, y_m, z_m$  — координати зображення точки в місцевості на фотознімку,

$X_S, Y_S, Z_S$  — лінійні елементи зовнішнього орієнтування фотознімка,

$x, y, z$  — координати точок знімку,

$a_i, b_i, c_i, i=1...3$  — направляючі косинуси, які являються функціями від кутових елементів зовнішнього орієнтування фотознімку.

Проблема використання залежності (1.4) полягає у тому що, зазвичай елементи зовнішнього орієнтування (ЕЗО) і висота точки місцевості невідомі. Для знаходження ЕЗО використовують опорні точки місцевості з відомими геодезичними координатами. Знаючи як мінімум три такі точки, можна обчислити лінійні та кутові елементи зовнішнього орієнтування. Для знаходження висоти є два підходи: на основі теорії стереопари фотознімків будується модель рельєфу або береться деяка середня висота на всю площу знімка. Застосування того чи іншого підходу залежить від необхідної точності.

## 1.2 Глобальні системи позиціонування(GPS)

Всі ГНСС складаються з трьох сегментів: космічного (супутники), керуючого (наземні станції) та споживчого (приймачі). Незважаючи на радикальну зміну можливостей визначення координат, супутникове позиціонування ґрунтується на класичній просторовій лінійній засічці. Для її вирішення від кожного супутника (всього їх має бути не менше 4-х) до приймача передаються так звані ефемериди, в яких міститься інформація про

координати супутників (Рис. 1.3). Відстань обчислюється двома способами: фазовим та кодовим [7]. Перший має високу геодезичну точність та, відповідно, вартість. Другий же значно нижчий за точністю, і ціною приймального обладнання, і, як наслідок, значно поширенішим: саме кодові приймачі встановлюють у смартфони.

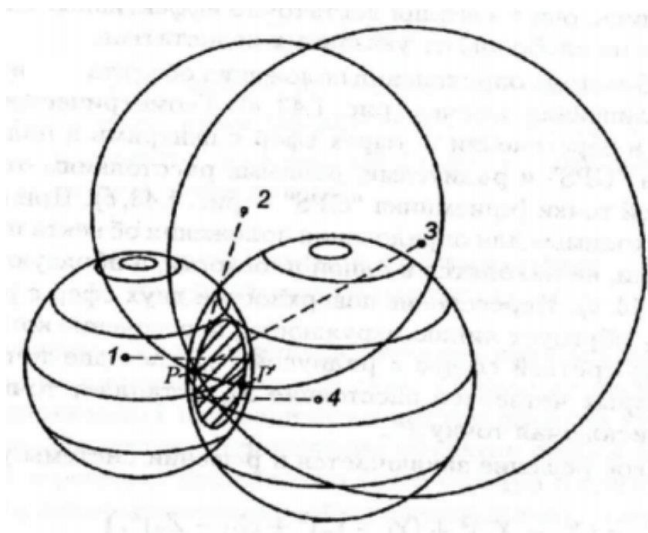


Рисунок 1.3 — Визначення положення об'єкту за допомогою GPS [7]

У зв'язку з накопиченням помилок при проходженні сигналу через атмосферу, для виконання високоточного позиціонування також застосовується диференціальний метод. Він полягає у обчисленні збільшення координат пунктів при вимірюванні кількома приймачами з урахуванням абсолютних координат опорної станції. У цьому випадку передбачається, що помилки приймача повторюватимуться на базовій станції і на сусідніх пунктах. Вони можуть бути враховані за допомогою транслявання поправок, що обчислюються за абсолютними координатами опорної станції [4].

Точність визначення абсолютних координат при абсолютному ГНСС-позиціонуванні у площині XY становить трохи більше 3.5 метрів. Використання диференціального методу і постобробка дозволяє досягати міліметрової точності. [8]

Сьогодні у штатному режимі діють дві повноцінні ГНСС: американська (GPS) [8] та російська (ГЛОНАСС) [9]. Активно розвиваються і ГНС інших країн: європейська (Galileo) [10] та китайська (Beidou) [11].

### **1.3 Локальні системи позиціонування(LPS)**

#### **1.3.1 QR-коди**

Локальна система позиціонування яка використовує QR-коди, базується на методі аналізу сусідства. Власник приміщення встановлює спеціальні штрих-коди, із зашифрованим url-посиланням на веб-сторінку, на якій вказуються географічне положення мітки на плані будівлі та контекстна інформація (текстова, аудіо, відео, реклама), що відноситься до цієї точки. Користувач, на мобільному пристрої якого встановлено програмне забезпечення для інтерпретації QR-коду, фотографує мітку, після чого на екрані відображається закладена в ньому інформація. Спосіб вважається вигідним з погляду фінансових витрат та швидкості створення системи - сьогодні він активно застосовується для визначення місця розташування в музеях [12]. Однак спосіб неприйнятний для безперервного відстеження положення об'єкту.

#### **1.3.2 Магнітне поле**

Відомо, що зміни у магнітному полі Землі викликані наявністю елементів заліза у різних предметах. Приміщення, де їх концентрація особливо висока, мають унікальну і неоднорідну картину магнітного поля. Цю неоднорідність використовують для позиціонування, використовуючи метод локалізації за шаблоном. В офлайн фазі складається карта-шаблон досліджуваної території, у кожному осередку якої містяться параметри магнітного поля (Рис. 1.4). В онлайн фазі параметри магнітометра порівнюються з картою, після чого знаходиться ділянка що найбільше відповідає шаблону, яка і показуватиме поточне розташування пристрою. MPS-позиціонування дозволяє досягати метрової точності [13].

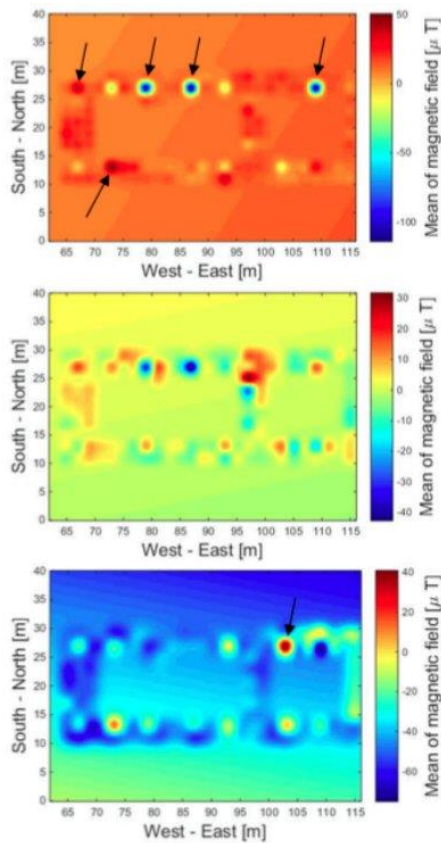


Рисунок 1.4 — Приклад шаблону магнітного поля [14]

Перевагою такої системи є відсутність витрат на придбання додаткового обладнання. Головний недолік - зміни у внутрішній інфраструктурі приміщення (наприклад, перепланування), які в свою чергу впливають на картину магнітного поля. При кожній флуктуації такого роду необхідно проводити повторні виміри для оновлення картки-шаблону [3].

### 1.3.3 Світлодіодні лампи

Позиціонування за світлом ламп стало можливим з появою світлодіодних ламп (LED), які дозволяють передавати інформацію в оптичному діапазоні довжин хвиль, аналогічно Wi-Fi [15]. Якщо лампи передаватимуть на приймач власні координати, то для визначення місцезнаходження може застосовуватися фотограмметричний метод. Використовується стандартний підхід, за винятком, що в ролі фотоапарата виступає сенсор екрану мобільного телефону. При попаданні на нього світла як мінімум від трьох ламп можна знайти елементи зовнішнього орієнтування

мобільного пристрою, після чого за координатами пікселів сенсора обчислюється його просторове положення (Рис. 1.5). Фотограмметричний метод дозволяє досягати субметрової точності визначення положення [16].

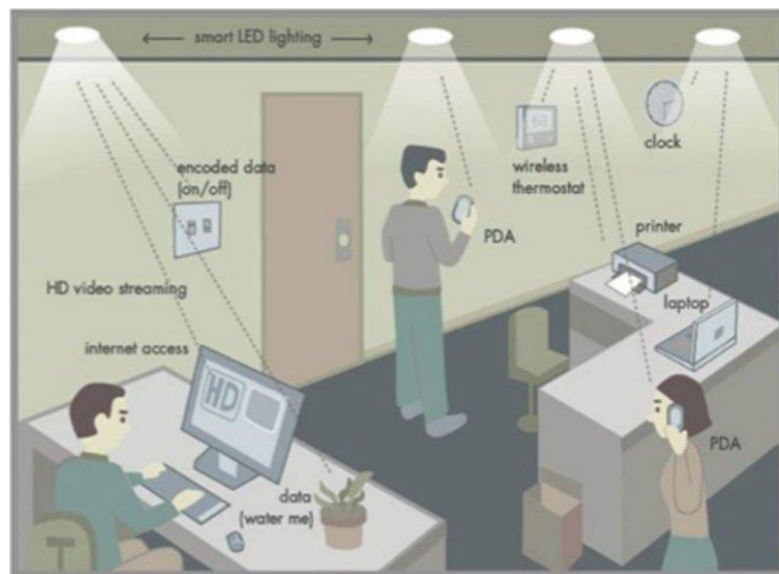


Рисунок 1.5 — Використання світлодіодних ламп для передачі інформації [15]

Існують реалізації систем позиціонування, заснованих на силі сигналу, що приймається від LED. Принцип аналогічний тому, що застосовується у мережах Wi-Fi, тільки замість радіохвиль, на приймач приходять оптичні хвилі. За такого підходу досягають високої точності позиціонування [17].

Головне обмеження на широке застосування таких систем – це невелика зона покриття світла від лампи, тому Li-Fi використовують лише у відносно невеликих приміщеннях. Крім того, при фотограмметричному методі рішення необхідне потрапляння світла від трьох ламп одночасно, чого у багатьох місцях немає.

#### 1.3.4 Інерційні системи

Найбільш популярним засобом позиціонування за допомогою інерційних систем є Pedestrian Dead Reckoning (PDR) - "навігаційне числення шляху". PDR-системи побудовані на інерційних системах, а основою для позиціонування являються вбудовані в мобільні пристрої акселерометри та гіроскопи. З їх допомогою послідовно вирішують завдання визначення кроку,

його довжини та напрямку руху користувача. Зазначається, що спосіб зручний для визначення місця розташування роботів[18]. Коли ж інерційні системи використовуються людиною, виникає різке накопичення помилок через складність і випадковість його переміщення. Людина може класти смартфон у кишеню, повертати його перпендикулярно до руху. Тому їх часто використовують для визначення різких стрибків прискорення разом із іншими системами позиціонування [19, 18].

### **1.3.5 Бездротові мережі**

Бездротові мережі дозволяють передавати інформацію між пристроями, забезпечують вихід в Інтернет та забезпечують абонентів стільниковим зв'язком. Крім цього, на їх основі побудовані нові, найпоширеніші способи позиціонування в приміщеннях. Вони поділяються на локальні та глобальні.

У перших інформація передається на коротких хвилях, в останніх – на довгих. Покриття локальних мереж значно менше, порівняно з глобальними, але точність значно вища [20]. Методика позиціонування в усіх бездротових мережах схожа й полягає у аналізі параметрів передавальних станцій на приймачі. В якості приймача зазвичай виступає датчик смартфона.

В [2] наводиться класифікація засобів позиціонування в бездротових мережах:

- Аналіз сусідства. Розташування визначається зоною покриття деякого радіопередавача. Розкид помилок буде прямо пропорційний площі покриття конкретним пристроєм, що передає [21].
- Лінійна засічка. Класичний геодезичний метод виміру, у якому відстань є функцією параметрів сигналу [22].
- Аналіз сцени. Також відомий як аналіз радіограми та метод локалізації за шаблоном по аналогії з позиціонуванням за магнітним полем. Точність цього методу вважається найвищою, але схильна до змін у зовнішньому середовищі [2, 4, 23].

Аналіз сусідства не потребує обчислень параметрів сигналу. У разі використання цього методу від точки передавача потрібен лише його унікальний ідентифікатор, на основі якого можна отримати координати станції та прив'язану до неї контекстну інформацію[24].

При використанні лінійної засічки або локалізації за шаблоном вимірюють наступні параметри станції, що передає точка або маячок[25]: кут сигналу що приймається, час поширення сигналу, фаза сигналу що приймається, сила сигналу що приймається.

## **1.4 Методи визначення дальності в бездротових мережах**

Методи позиціонування бездротових мереж в основному базуються на класичних, астрономо-геодезичних методах, та відрізняються засобом визначення відстані між об'єктом та станціями. Також незалежно від вимірюваного параметра можлива локалізація за шаблоном.

### **1.4.1 Метод Angle of Arrival (AoA)**

AoA базується на визначенні місця розташування об'єкта відносно станцій що приймають сигнал з визначенням куту ( $\theta_i$ ) до джерела, для визначення якого необхідні направлені антени, наприклад адаптивна фазована решітка з двох чи більше антен. Розташування об'єкта визначається перетином умовних ліній, що проходять від станцій до об'єкта.

Для цього, отримавши значення фаз сигналів на антени станції та обчисливши їх різницю, визначається кут щодо об'єкта.

Наприклад, дві антени розташовані на певній відстані один від одного, приймаючи радіочастотний сигнал матимуть різницю фаз, пропорційну різниці між їх відповідними відстанями від об'єкта.

Це виглядає як сигнал прийнятий на одну антену затримується відносно сигналу прийнятого іншою антеною. Якщо відстань між антенами менше  $\lambda/2$ , завжди можна визначити, яка з них найближче до об'єкта.

Якщо всі антени розташовані на прямій лінії з проміжком  $d$  між ними, різниця фаз  $\phi$  між сусідніми антенами буде однаковою.



При перетворенні фазового зсуву ( $\phi$ ) в кут ( $\theta$ ) для AoA, необхідно враховувати що якщо значення  $\phi$  негативне, це означає, що друга антена приймає сигнал раніше за першу і значення  $\theta$  в цьому випадку також негативне. Кут розраховується за формулою:

$$\sin(\theta) = \frac{r}{d} \quad (1.5)$$

де  $r$  – відстань, утворена перетином променів від двох антен пристрою,  
 $d$  – відстань між антенами.

З урахуванням того що відстань до перетину рівна:

$$r = \frac{\lambda\phi}{2\pi} \quad (1.6)$$

де  $\lambda$  – довжина несучої хвилі,  
 $\phi$  – значення різниці фаз

Та також визначається як:

$$r = d \cdot \sin(\theta) \quad (1.7)$$

Кут приходу сигналу визначається як:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\lambda \cdot \phi}{2\pi \cdot d}\right) \quad (1.8)$$

При визначенні координат в двовимірному просторі достатньо двох станцій з подібними антенами, в тривимірному – трьох станцій.

Перевагами даного методу являються простота алгоритму визначення місцеположення об'єкту, великий радіус дії та те що цей метод не потребує синхронізації пристроїв.

Недоліками являються складність антени та виникнення хибних кутів внаслідок перевідбиття сигналу.

### 1.4.2 Метод Time of Arrival (ToA)

ToA базується на вимірі затримки часу поширення сигналу між пристроєм і станцією та швидкості поширення сигналу. Найбільш широко використовується в глобальній системі позиціонування (GPS).

Об'єкт відправляє сигнал до станції в точно відомий час, яка вимірює часовий інтервал між моментом відправки сигналу об'єктом і його отриманням. Відстань від об'єкта до станції розраховується за формулою:

$$d_i = c \cdot (t_{PP_i} - t_{B_i}) \quad (1.9)$$

де  $c$  – швидкість світла,

$t_{B_i}$  – час відправлення сигналу від об'єкта,

$t_{PP_i}$  час прибуття сигналу зафіксований на станції.

Для розрахунку положення об'єкту в двовимірному просторі використовується алгоритм кругової латерації, для чого необхідно знати відстані що найменше до трьох станцій та вирішити систему з рівнянь наступного виду:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \quad (1.10)$$

де  $(x_i; y_i)$  – відоме положення  $i$ -тої станції,

$(x_0; y_0)$  – положення об'єкту що визначається,

$d_i$  – відстань від об'єкта до  $i$ -тої станції.

Отримана система рівнянь описує радіуси навколо станцій, точка перетину яких визначає положення об'єкта, для точного визначення положення в тривимірному просторі необхідно принаймні чотири станції.

Перевагами методу є досить висока точність, при нормальних зовнішніх умовах без перешкод, та невелике енергоспоживання об'єкта.

Недоліками методу являється необхідність синхронізації часу між усіма станціями та об'єктом, та потреба побудови моделі поширення сигналу

в кожному конкретному середовищі, для кожної окремої точки доступу через виникнення в приміщенні таких ефектів як, загасання, відбиття та накладання сигналу.

### 1.4.3 Метод Time Difference of Arrival (TDoA)

*TDoA* базується на визначенні різниці часу прибуття сигналу на декілька станцій від об'єкта. При цьому фіксувати час відправлення сигналу від об'єкта немає необхідності, тільки швидкість поширення сигналу та час прийому станцією. Після отримання сигналу двома станціями отримана різниця в часі використовується для розрахунку різниці відстаней між об'єктом та станціями:

$$\Delta d = c \cdot \Delta t \quad (1.11)$$

де  $\Delta d$  – різниця відстаней між об'єктом та станціями,  
 $c$  – швидкість світла,  
 $\Delta t$  – різниця в часі прийому між двома станціями.

У випадку з двома станціями (наприклад, станція 1 та станція 2) рівняння для розрахунку положення об'єкта матиме вигляд:

$$\Delta d_{12} = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} - \sqrt{(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2} \quad (1.12)$$

де  $(x_i; y_i)$  – відоме положення  $i$ -тої станції,  
 $(x_0; y_0)$  – положення об'єкту що визначається,  
 $\Delta d_{12}$  – різниця відстаней від об'єкта до станцій 1 та 2.

Для визначення точного положення об'єкту необхідно виконати алгоритм гіперболічної латерації, що потребує щонайменше три станції та розв'язати систему з рівнянь виду(1.12).

Даний метод передбачає високий рівень синхронізації станцій, оскільки похибка в одну наносекунду відповідає відхиленню від дійсного положення приблизно на 30 сантиметрів.

Перевагами методу являються низьке енергоспоживання об'єктом, великий радіус дії, висока точність(при високій синхронізації) та прості вимоги до антен станцій та об'єкту.

Недоліками є необхідність високої синхронізації та складність алгоритму визначення положення.

#### 1.4.4 Метод Received-Signal Strength (RSS)

RSS базується на показнику рівня сигналу, для визначення якого використовується залежність між відстанню та силою сигналу що приймається за моделлю поширення, що враховує тільки загасання сигналу та має вигляд[26]:

$$P_i = P_0 - 10 \cdot a \cdot \lg\left(\frac{r_i}{r_0}\right) + v_i, \quad (1.13)$$

де  $P_i$  — виміряна об'єктом потужність, отримана від  $i$ -того маяка, що знаходиться на відстані  $r_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $n$  — кількість Bluetooth маяків;

$P_0$  — потужність сигналу на відомій відстані  $r_0$ ;

$a$  — коефіцієнт загасання в середовищі;

$v_i$  — помилка вимірювання потужності сигналу.

З формули випливає, що, маючи калібрувальну потужність на відомій відстані від передавача, можна отримати відстань у будь-якій точці зони, що покривається передавачем. Провівши аналогічні вимірювання одночасно з  $n$  передавачів з відомими координатами, можна отримати  $n$  відстаней. Використовуючи формулу лінійної засічки, на наступному кроці можна обчислити положення приймаючого пристрою [22].

### 1.5 Технології позиціонування в бездротових мережах

Вибір бездротової мережі для цілей позиціонування насамперед залежить від необхідної точності позиціонування та фінансових можливостей замовника.

### 1.5.1 Технологія Wi-Fi

Технологія Wi-Fi має середній радіус передачі даних, зазвичай це десятки метрів. Для забезпечення доступу до мережі ця технологія використовує неліцензовані діапазони частот. Спосіб позиціонування за допомогою Wi-Fi мережі здійснюється через базову станцію, до якої підключений абонент. Оскільки дана технологія при створенні не призначалася для визначення позиції об'єкта, стандартна мережа надає інформацію лише о потужності сигналу, тому для визначення місцеположення використовується метод RSS або TDoA. Wi-Fi мережі дають високу (метрову) точність [2], у зв'язку з чим по праву займають позицію лідера по популярності серед усіх LPS. Проте в реальних умовах через відбиття та накладання сигналів і завади потрібно встановлювати додаткові станції.

Вимоги до Wi-Fi обладнання описані в наборі стандартів IEEE 802.11. З випуском кожного нового стандарту, 802.11 додається буква, наприклад, 802.11a/b/n і т.д. На сьогоднішній день налічується кілька десятків різновидів стандартів Wi-Fi. Не всі стандарти спрямовані на збільшення швидкості передачі даних, деякі з них покращують питання безпеки (наприклад, 802.11i), інші включають опис роботи роумінгу (802.11r). У таблиці 1.1 наведено стандарти бездротового зв'язку Wi-Fi, у яких проводилося збільшення швидкостей передачі та роки їх випуску.

Таблиця 1.1 — Порівняння швидкості стандартів Wi-Fi

Стандарт	Діапазон	Рік випуску	Приблизна швидкість, Мбіт/с
802.11	2.4 ГГц	1997	1
802.11b	2.4 ГГц	1999	5(11)
802.11a	5 ГГц	2001	54
802.11g	2.4 ГГц	2003	54
802.11n	2.4/5 ГГц	2009	600
802.11ad	60 ГГц	2009	7000
802.11ac	5 ГГц	2014	7000
802.11ax	2.4/5 ГГц	2019	10000
802.11ay	60 ГГц	В розробці	20000

При цьому слід зазначити, що не всі перераховані стандарти Wi-Fi служать для організації бездротових локальних мереж як роутери, що працюють в діапазонах 2.4 і 5 ГГц (стандарти 802.11 a/b/g/n/ac/ax). Такі стандарти як 802.11ad та 802.11ay спочатку планувалося випустити для передачі даних на невеликі відстані – від 1 до 10 метрів – та, у перспективі, використовувати їх для організації високошвидкісних інтерфейсів передачі даних, наприклад для підключення моніторів до комп'ютера з передачею зображення у форматі 8K. Однак, в результаті розвитку 5G-мереж та переходом в діапазон до 100 ГГц, пристрої з підтримкою 802.11ad стали застосовуватися для організації радіодоступу поза приміщеннями. Проте для таких частот мають бути забезпечені умови прямої видимості.

### 1.5.2 Технологія Bluetooth

В основі архітектури Bluetooth лежить пікомережа (piconet). Вона представляє централізовану мережу з одного головного вузла та до семи підлеглих вузлів у радіусі 10 метрів[27]. Пікомережі зв'язуються між собою за допомогою спеціального вузла – мосту. Такі об'єднані мережі складають розсіяну мережу (scatternet).

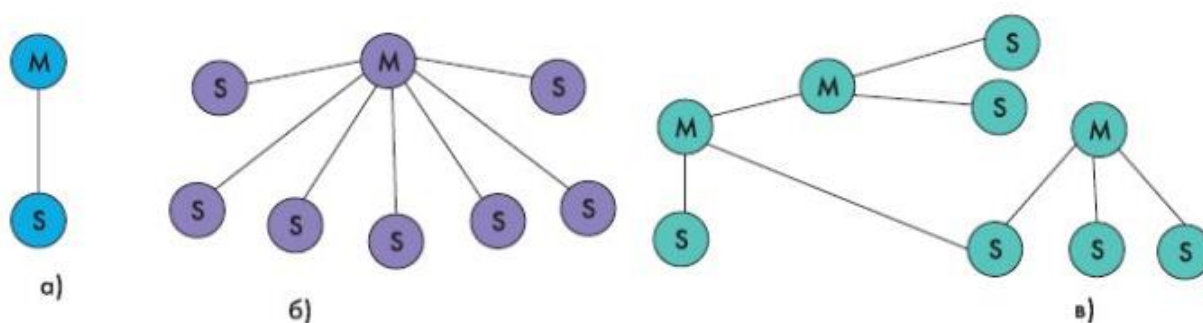


Рисунок 1.6 — Види топології мереж Bluetooth

Всі пристрої мережі поділяються на головні (master) та підлеглі (slave). Обмін інформацією може здійснюватися лише між ведучими та підлеглим пристроями. Кожен пристрій може бути як головним так і підлеглим[28]

Пікомережа (рис 1.7 а, б):

- в одній пікомережі існує тільки один головний пристрій, всі інші – підлеглі
- максимальна кількість пристроїв однієї пікомережі, що одночасно беруть участь у передачі інформації, – не більше 8
- загальна кількість пристроїв, підключених до провідного пристрою однієї пікомережі, не обмежена
- у кожний момент часу обмін даними може йти тільки між двома пристроями в одному напрямку

Розсіяна мережа (рис 1.7 в):

- утворюється шляхом перекриття окремих пікомереж.
- кожен пристрій однієї пікомережі може входити в іншу пікомережу в якості як підлеглого, так і як головного

В архітектурі Bluetooth реалізовано часове ущільнення — головний вузол контролює та розподіляє часові інтервали між підлеглими вузлами. Безпосередньо підлеглі вузли не пов'язані — зв'язок здійснюється через головний вузол.

Технологія Bluetooth розвивалась протягом багатьох років та має декілька версій які відрізняються протоколами та технічним забезпеченням.

Таблиця 1.2 — Порівняння версій Bluetooth

	4.1	4.0	3.0	2.x	1.x
Базова швидкість	1 Мбіт/с	1 Мбіт/с	1 Мбіт/с	1 Мбіт/с	1 Мбіт/с
Підвищена швидкість передачі (EDR)	3 Мбіт/с	3 Мбіт/с	3 Мбіт/с	3 Мбіт/с	ні
High Speed	54 Мбіт/с	54 Мбіт/с	54 Мбіт/с	ні	ні
Дальність (макс./мін. потужність)	100 м/ 10 м	100 м/ 10 м	100 м/ немає	100 м/ немає	100 м/ немає
Режим низького енергоживлення	так	так	ні	ні	ні
Подвійний профіль (одночасно Master и Slave)	так	ні	ні	ні	ні

	4.1	4.0	3.0	2.x	1.x
Підтримка IPv6	готується	ні	ні	ні	ні
Спряження NFC	так	так	да	да	ні
128-бітне шифрування AES	так	так	ні	ні	ні

Найбільш розповсюджена версія Bluetooth на даний момент 4.1, включає такі параметри

- класичний Bluetooth що дає можливість працювати з пристроями попередніх версій;
- високошвидкісний Bluetooth який працює на протоколах WiFi;
- Bluetooth з низьким енергоспоживанням (BLE).

Смуга частот: 2402 000 000 – 2480.1 000 000 (2,402 ГГц – 2,48 ГГц)

Протокол BLE призначений, перш за все, для мініатюрних електронних датчиків (які використовуються у спортивному взутті, тренажерах, мініатюрних сенсорах, що розміщуються на тілі пацієнтів тощо). Низьке енергоспоживання досягається рахунок використання особливого алгоритму роботи. Передавач включається лише на час надсилання даних, що забезпечує можливість роботи від однієї батареї протягом декількох років. Стандарт забезпечує швидкість передачі в 1 Мбіт/с при розмірі пакетів даних від 8 до 27 байт. Два Bluetooth-пристрої встановлюють з'єднання одно з одним менш ніж за 5 мілісекунд та підтримують його на відстані до 100 м. Для цього використовується вдосконалена корекція помилок, а необхідний рівень безпеки забезпечується 128-бітовим AES-шифруванням.

Датчики температури, тиску, вологості, швидкості пересування тощо на основі цього стандарту можуть передавати інформацію на різні пристрої контролю: мобільні телефони, КПК, ПК тощо [29].

Також створено версії 5.0, в якій підвищено максимальний радіус дії у чотири рази та 5.1 з якою додано направлені антени що створює можливість використання методу AoA. Проте ці версії ще не набрали розповсюдження.



### **1.5.3 Технологія надширокосмугового зв'язку (UWB)**

Ultra-Wide Band або ж надширока смуга — відносно нова технологія бездротового зв'язку, яка використовує надширокий діапазон частот (у США це 3,1—10,6 ГГц, у Євросоюзі — 6—8 ГГц) із гранично низькою спектральною щільністю потужності у зв'язку з чим чутливість до змін у зовнішньому середовищі набагато нижче. Що дозволяє зберігати ефективність в приміщеннях зі складною геометрією і великою кількістю завад, безпечність передачі та відсутність виклику завад для більшості пристроїв. Точність позиціонування, яку пропонує UWB при цьому набагато вище за аналоги: до 20 см[30]. На сьогоднішньому етапі розвитку протокол Ultra-Wide Band захищений за допомогою криптографії, так що імпульси, що передаються, не можуть бути записані та ретрансльовані зловмисниками.

На близьких відстанях UWB пропонує передачу даних на швидкостях, недоступних Bluetooth: 480 Мбіт/с, проте лише на відстані до 3 м. Основними недоліками таких систем є те, що із збільшенням відстані швидкість передачі даних стрімко падає: на відстані в 10 м вона становить вже 110 Мбіт/с. Також недоліком є фінансові витрати на систему передавачів [4].

### **1.5.4 Технологія ZigBee**

ZigBee це відкритий глобальний стандарт бездротової технології, розроблений для використання цифрових радіосигналів із низьким енергоспоживанням для персональних мереж. Це популярний протокол зв'язку, який використовується у системах Smart Home. Являється мовою, необхідною смарт-пристроєм для «розмови» один з одним.

Стандарт працює за специфікацією радіочастот IEEE 802.15.4 у неліцензованих низькочастотних діапазонах 2,4 ГГц. Використовується у пристроях, які не мають величезної пропускнуєї спроможності. Наприклад, якщо смарт-пристрій спить, мережний протокол може надіслати сигнал, щоб розбудити його і почати спілкуватися. Для зв'язку із сусідніми пристроями протокол використовує стандартний діапазон персональної мережі. Такий

діапазон дорівнює 10-20 метрів залежно від рівня сигналу або факторів, які можуть заважати сигналу.

Протокол ZigBee підтримує такі топології мережі: «точка-точка», багато-точкові та комірчасті мережі. Має низьку затримку відгуку та низький робочий цикл, за рахунок чого збільшує термін служби акумулятора. Забезпечує спектр поширення прямої послідовності. Може включати до 65000 мережевих вузлів. Має шифрування 128-bit для безпечного підключення до даних.

Ключовим компонентом протоколу ZigBee є можливість підтримки мережі комірчастої мережі (mesh). Кожен пристрій є «вузлом», невеликою частиною більшої mesh мережі. Принцип осередкової топології працює як послідовне з'єднання. Замість того, щоб просто відправляти чи отримувати, вузли починають повторювати сигнали, створюючи оду велику мережу.

При цьому з'єднання між вузлами динамічне, та оновлюються і оптимізуються за допомогою складної вбудованої таблиці маршрутизації. Що являється високо-ефективним способом надсилання сигналів. Таким чином, вузли відображають сигнали один від одного, збільшуючи діапазон дії і приєднуючи до роботи всі пристрої та датчики.

### **1.5.5 Технологія nanoLOC**

Технологія nanoLOC використовує станції прийомо-передачі Nanotron які мають діапазон 2,4 ГГц і використовуються там, де використання мереж Wi-Fi неможливо через їх властивості споживати багато енергії, а також там, де продуктивності ZigBee та Bluetooth не вистачає. Наприклад системи домашньої автоматизації, моніторингу та управління, охоронні системи.

Швидкість передачі інформації складає до 2 Мбіт за секунду, при досить високому рівні стійкості до перешкод. Це є основною відмінністю даних передавачів від інших пристроїв, що працюють в діапазоні 2,4 ГГц. Причому, інформація може передаватися на відстань не однієї сотні метрів. Також станції можуть визначати відстань між собою. Похибка у визначенні

відстані складає 2 метри, що дозволяє визначати, де знаходиться станція по відношенню до інших таких же станцій.

В основі технології NanoLOC покладено метод вимірювання дистанцій SDSTWR. Цей метод полягає в тому, що в системі яка складається з двох об'єктів, для отримання даних про відстань між цими об'єктами, відбувається обмін пакетами певної інформації між двома цими об'єктами. Так, перший об'єкт запитує у другого вимір відстані, з фіксацією часу відправки пакета даних. Другий об'єкт після отримання інформації надсилає першому підтвердження, час отримання якого також фіксується у першому об'єкті. Далі відбувається обробка інформації та аналіз різниці часу між пересиланням підтвердження та часу, необхідного для обробки інформації. За допомогою ділення отриманих даних на два, перший об'єкт визначає час, протягом якого радіосигнал доходить до другого об'єкта. Знаючи швидкість проходження радіохвиль, за допомогою отриманих даних можна визначається відстань. Для більшої точності процедуру повторюють кілька разів.

Обробка сигналу, який приймається, відбувається за допомогою дисперсійної лінії затримки. Вона виконується на основі фільтрів поверхневих акустичних хвиль. При цьому ширина спектральної смуги становить 20 МГц. При каналах що не перекриваються частотні канали FDMA використовуються в кількості трьох, або в кількості семи при каналах, що перекриваються. Такі параметри дають можливість одночасного використання кількох бездротових мереж локального призначення в одному приміщенні.

## **1.6 Висновки по розділу**

Системи позиціонування, в тому числі і локального являються необхідними з давніх часів. Їх вдосконалення є актуальною задачею оскільки висока точність визначення місцеположення не досягається в усіх необхідних місцях.

Серед розглянутих глобальних та локальних систем позиціонування для визначення місцезнаходження в середині приміщення найкраще підходять системи побудовані за допомогою бездротових мереж, які можуть базуватись на таких технологіях як Wi-Fi, Bluetooth, UWB, ZigBee, nanoLOC. При цьому доступно декілька методів визначення відстані від станцій до об'єкта, в таблиці 1.3 наведено доступність методів для технологій.

Таблиця 1.3 — Доступність методів для технологій позиціонування

	AoA	ToA	TDoA	RSS
Wi-Fi	-	-	-	+
Bluetooth	-	-	-	+
UWB	+	+	+	-
ZigBee	-	+	+	+
nanoLOC	-	+	+	+

Враховуючи поширеність та вартість технологій, простоту реалізації і необхідну точність, для позиціонування в приміщенні найбільш доцільною являється технологія Bluetooth з методом визначення координат що базується на RSS вимірах.

## Розділ 2 Алгоритми та методи визначення положення об'єкта

### 2.1 Алгоритми позиціонування

Алгоритми позиціонування являють собою підходи до вирішення задачі позиціонування об'єкта на основі потужності сигналів, випромінюваних декількома точками доступу. У цьому розділі наводиться огляд основних алгоритмів позиціонування.

#### 2.1.1 Найближча точка доступу (Proximity)

В алгоритмі Proximity [31, 32] об'єкту приписуються координати станції, яка випромінює сигнал найбільшої потужності. Цей алгоритм вважається найпростішим з погляду на обчислення. Так, якщо в кімнаті знаходиться чотири точки доступу  $AP_1$ - $AP_4$  (рис. 2.1), сигнал найбільшої потужності  $P_1$  прийнятий від  $AP_1$ , тоді агенту присвоюються координати  $AP_1$ .

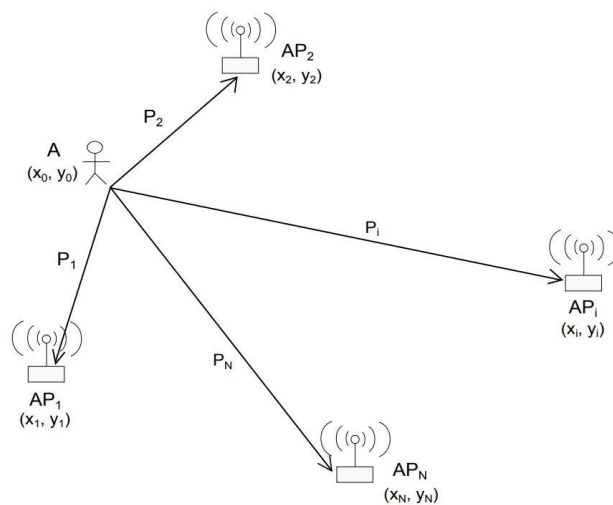


Рисунок 2.1 — Приклад положення станцій у приміщенні

До переваг даного алгоритму можна віднести простоту реалізації через низьку обчислювальну складність та необхідність знати тільки місцезнаходження точок доступу. Явним недоліком є дуже низька точність, похибка може досягати дальності трансляції сигналу станцією (приміщення до 100 метрів). Даний алгоритм може бути прийнятним для вирішення

певного роду завдань (наприклад, у стільниковому зв'язку, даний підхід застосовується для визначення з якою станцією необхідно асоціювати телефон) або може бути застосований як початкове наближення для роботи іншого алгоритму. Даний алгоритм можна віднести до базових, які не потребують попередніх вимірів.

### 2.1.2 Центроїд (Centroid)

Алгоритм Centroid, який описано у [33], являє собою обчислення геометричного центру плоскої фігури, утвореної декількома станціями. У такому випадку координати об'єкта обчислюються як лінійна комбінація координат точок доступу [33]. Цей алгоритм є досить простим з обчислювальної точки зору. Положення об'єкта визначається за такими формулами:

$$\begin{cases} X_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \\ Y_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i \end{cases} \quad (2.1)$$

До переваг даного алгоритму можна віднести простоту реалізації та необхідність знати лише положення точок доступу. Очевидним недоліком є низька точність. Оскільки інформація про потужність сигналів не враховується, похибка може досягати дальності трансляції сигналу точкою доступу (приміщення до 100 метрів). Даний алгоритм може бути прийнятним для вирішення певного ряду завдань (наприклад, визначення в якій частині будівлі знаходиться об'єкт) або може бути застосований як початкове наближення для роботи іншого алгоритму. Алгоритм можна характеризувати як базовий і не вимагає попередніх вимірів.

### 2.1.3 Ваговий центроїд (Weighted centroid)

Алгоритм Weighted centroid є покращеною версією попереднього алгоритму [32], за рахунок додавання до розрахунку потужності сигналів, що приймаються. Тоді координати об'єкта можуть бути обчислені як лінійна комбінація координат станцій з урахуванням потужності сигналів як

характеристики ваги. Цей алгоритм є досить простим із обчислювальної точки зору. Положення об'єкта визначається за такою системою рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} X_0 = \sum_{i=1}^N \mu_i X_i \\ Y_0 = \sum_{i=1}^N \mu_i Y_i \\ \mu_i = \left( P_i^2 \sum_{j=1}^N \frac{1}{P_j^2} \right)^{-1} \end{array} \right. \quad (2.2)$$

де  $\mu_i$  — вагова характеристика.

Перевагами цього алгоритму також являються простота реалізації, та необхідність знати лише положення точок доступу. До недоліків можна віднести залежність від кількості точок доступу одночасно доступних об'єкту. Чим більше сигналів від відомих точок доступу приймає об'єкт, тим вище буде точність обчислення його розташування. Даний алгоритм демонструє більш високу точність порівняно з попередніми, однак для високоточного позиціонування всередині приміщень таких результатів недостатньо. Алгоритм можна віднести до базових, які не потребують попередніх вимірів.

#### 2.1.4 Порівняння із зразком (Fingerprinting)

Алгоритм Fingerprinting являє собою підхід, заснований на диференціації просторових сигнатур сигналу [34, 35]. Положення об'єкта визначається шляхом порівняння вимірних в даний момент сигнатур потужності сигналів від усіх доступних точок доступу з сигнатурами, що зберігаються в заздалегідь сформованій базі даних.

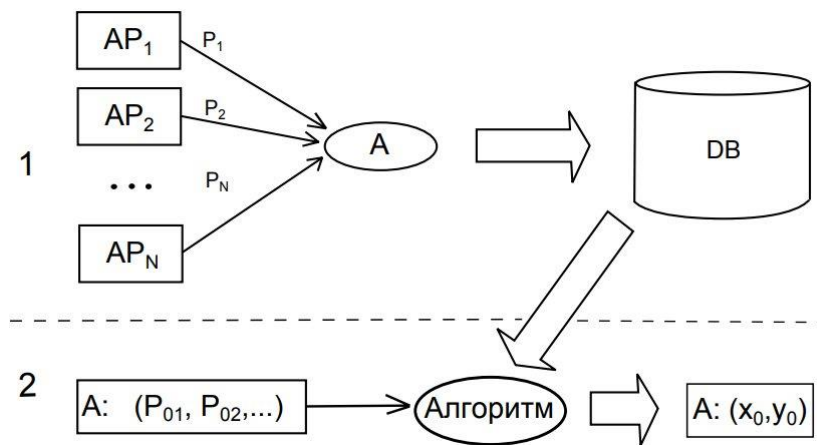


Рисунок 2.2 — Стадії алгоритму Fingerprinting

На рис. 2.2 зображено дві стадії роботи алгоритму:

1. Стадія виміру середовища. На даному етапі здійснюються вимірювання потужності сигналів у заздалегідь запланованих відомих місцях від усіх активних станцій. Зібрана інформація зберігається у базі даних із прив'язкою до локальних чи глобальних координат приміщення.
2. Стадія позиціонування. На даному етапі вимірювання потужності сигналів, вироблені над агентом, порівнюються з інформацією, що зберігається в базі даних, за допомогою деякого алгоритму (найближчий сусід [36], Fuzzy c-Means [37], нейронна мережа [38], імовірнісні підходи [36, 35] та ін.). Результатом роботи цього етапу є координати положення об'єкта.

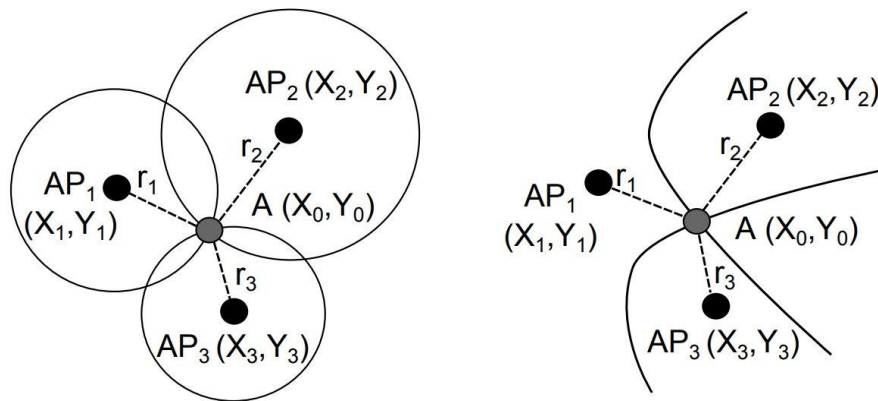
Явною перевагою цього алгоритму є висока точність. При високій щільності покриття приміщення вимірювання, похибка може бути зведена практично до нуля. Звідси впливає ряд недоліків: необхідність величезної кількості часу для створення бази даних; постійна пере-конфігурація, пов'язана із змінами в середовищі (наприклад, додавання/видалення станцій або перешкод); висока обчислювальна складність. Найкращим варіантом є застосування даного алгоритму в статичному середовищі, а також як база для роботи іншого алгоритму. Алгоритм можна віднести до базових з необхідністю попередніх вимірів.



### 2.1.5 Латерація (Lateration)

Алгоритм Lateration являє собою геометричний підхід до вирішення поставленої задачі. Він заснований на обчисленні відстаней між точкою, координати якої визначаються, і як мінімум трьома станціями з подальшим рішенням системи з  $N$  нелінійних рівнянь [31]. При  $N=3$  цей метод також відомий як трилатерація.

На рис. 2.3 зображені геометричні підходи до розв'язання задачі позиціонування, де  $r_i$  – відстань до  $i$ -ї станції від об'єкта.



а) Кругова латерація

б) Гіперболічна латерація

Рисунок 2.3 — Геометричне відображення позиціонування

Кругова латерація (рис. 2.3 а) базується на відстані між точкою, положення якої розраховується, та положенням станцій. Для обчислення координат об'єкта необхідно вирішити систему з рівнянь виду:

$$r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (2.3)$$

Гіперболічна латерація (рис. 2.3 б) базується на різниці відстаней між об'єктом, положення якого розраховується, та місцезнаходженням станцій. Для визначення положення об'єкта необхідно вирішити систему з рівнянь виду:

$$r_i - r_0 = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (2.4)$$

Перевагою алгоритму є досить висока точність при відповідних параметрах середовища. Недоліком алгоритму є необхідність ретельної

побудови моделі розповсюдження сигналу в кожному конкретному середовищі, для кожної окремої точки доступу, що в кінцевому підсумку не гарантує дуже високу точність, в результаті виникнення в приміщенні таких ефектів як згасання та відбиття сигналу, моделювання яких є дуже проблемним завданням. Даний алгоритм є одним з базових, знайшов застосування в GPS та сотових мережах, де подібні високочастотні ефекти не виникають і побудова моделі поширення сигналу не є настільки трудомістким завданням.

### 2.1.6 Диференціальна латерація (Differential lateration)

Даний алгоритм є альтернативою попереднього і являє собою метод апроксимації, заснований на переборі можливих координат об'єкта, з метою знаходження найближчої точки до місця перетину кіл [32]. Перевагою даного алгоритму є відсутність необхідності калібрування параметрів моделі поширення сигналу. Алгоритм представлений у таких варіантах реалізації:

*Варіант 1.* Координати об'єкта обчислюються через мінімізацію функціоналу, ядром якого є відношення загасань сигналу від 1 та  $i$ -ї точки доступу до довільної точки з координатами  $(x, y)$  [32]. Вважатимемо, що коефіцієнт загасання сигналу, виражений у децибелах, відповідає формулі [39]:

$$P(d) = P_0 - n \cdot 10 \lg(d) \quad (2.5)$$

де  $d$  — Відстань до об'єкта,

$P_0$  — значення потужності сигналу на відстані одного метра

$n$  — коефіцієнт поширення сигналу.

Оскільки значення  $P_0$  та  $n$  невідомі, для того, щоб позбавитися цих невизначених параметрів, необхідно оцінити положення об'єкта через мінімізацію наступного функціоналу:

$$\begin{cases} (X_0, Y_0) = \arg \min [\gamma(x, y)] \\ \gamma(x, y) = \sum_{i=2}^N \left| \frac{P_i}{P_1} - \frac{\lg[d_i(x, y)]}{\lg[d_1(x, y)]} \right|^2 \end{cases} \quad (2.6)$$

де  $d_1$  та  $d_i$  — відстані від 1-ї та  $i$ -ї точки доступу до поточної точки з координатами  $(x, y)$ .

*Варіант 2.* Координати об'єкта також обчислюються через мінімізацію функціоналу, ядром якого є відношення загасань сигналу від 1 та  $i$ -ї точок доступу. Однак перед цим відбувається оцінка параметрів моделі поширення сигналу шляхом мінімізації середньоквадратичної помилки [32]:

$$\begin{bmatrix} P_0 \\ n \end{bmatrix} = (M^T M)^{-1} M^T P, \quad M = \begin{bmatrix} 1 & -10\lg(d_1) \\ \dots & \dots \\ 1 & -10\lg(d_T) \end{bmatrix}, \quad P = \begin{bmatrix} P_1 \\ \dots \\ P_K \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Тоді положення об'єкта може бути оцінено через мінімізацію нового функціоналу:

$$\begin{cases} (X_0, Y_0) = \arg \min [\gamma(x, y)] \\ \gamma(x, y) = \sum_{i=2}^N \left| \frac{P_i}{P_1} - \frac{P_0 - n \cdot 10\lg[d_i(x, y)]}{P_0 - n \cdot 10\lg[d_1(x, y)]} \right|^2 \end{cases} \quad (2.8)$$

*Варіант 3.* Координати об'єкта обчислюються через мінімізацію функціоналу, ядром якого є різниця загасань сигналу від 1-ї та  $i$ -ї точок доступу. Цей алгоритм є модифікацією варіанта 2. Функціонал для мінімізації визначається наступним виразом:

$$\begin{cases} (X_0, Y_0) = \arg \min [\gamma(x, y)] \\ \gamma(x, y) = \sum_{i=2}^N \left| (P_i - P_1) - ((P_0 - n \cdot 10\lg[d_i(x, y)]) - (P_0 - n \cdot 10\lg[d_1(x, y)])) \right|^2 \end{cases} \quad (2.9)$$

Перевагами є простота реалізації та досить висока точність. Варіанти алгоритму 2 і 3 демонструють ще більш високу точність, оскільки проводиться оцінка параметрів моделі поширення сигналу. До недоліків можна віднести підвищену обчислювальну складність. Для підвищення

якості роботи алгоритму потрібне початкове наближення, що дозволить зменшити обчислювальну складність. Даний алгоритм можна віднести як до базових, так і поліпшуваних, причому для нього не потрібні попередні виміри.

### 2.1.7 Навігаційне числення (Deduced reckoning)

Алгоритм навігаційного числення — один із найстаріших алгоритмів позиціонування, являє собою обчислення або екстраполяцію поточної позиції об'єкта на основі попередньої позиції, напрямку руху та швидкості об'єкта або подоланої ним дистанції [31].

Принцип цього підходу зображено на рисунку 2.4, де  $(x_0, y_0)$  — остання відома позиція об'єкта,  $\alpha$  — напрямок руху,  $L$  — подолана дистанція,  $(x_1, y_1)$  — поточна позиція об'єкта.

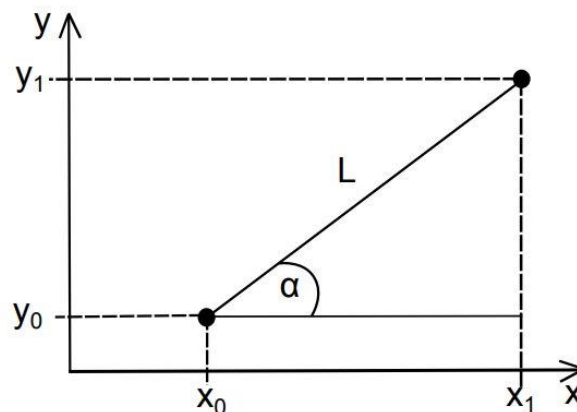


Рисунок 2.4 — Принцип алгоритму навігаційного числення

Координати поточної позиції об'єкта можуть бути визначені за такою формулою:

$$x_1 = x_0 + L \cos \alpha, \quad y_1 = y_0 + L \sin \alpha \quad (2.10)$$

Якщо дистанція невідома, вона може бути обчислена за формулою:

$$L = v \Delta t \quad (2.11)$$

де  $v$  — швидкість об'єкта,  $\Delta t$  — час затрачений на рух.

До переваг можна віднести низьку обчислювальну складність та використання такої інформації як швидкість, напрямок руху та ін. Недоліками є необхідність отримання початкової позиції та складність збору

інформації про напрямок руху, швидкість та подолану відстань. Навігаційне числення не є окремою технікою позиціонування. Цей алгоритм завжди використовується в сукупності з іншими методами з метою покращення результату.

### 2.1.8 Алгоритм Handover

Алгоритм Handover, запропонований в [40], є надбудовою, призначеною для підвищення точності визначення розташування об'єкта. В основі даного алгоритму лежить принцип визначення напрямку руху об'єкта по потужності сигналів, що змінюються, від різних станцій.

Для роботи алгоритму спочатку необхідно отримати початкове місце розташування об'єкта ( $A_0$ ) стороннім алгоритмом, потім покрити область пошуку регулярною мережею (рис. 2.5), параметри якої розраховуються за такими формулами (2.13) та (2.14)

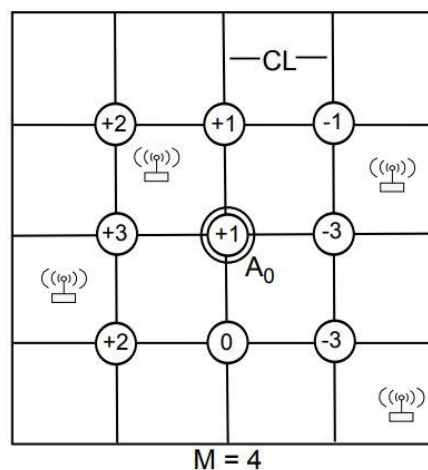


Рисунок 2.5 — Мережа в області пошуку та початкове наближення  $A_0$

$$CL = \frac{2 \cdot d_{\min}}{N_{\min}} \quad (2.12)$$

де  $CL$  — розмір комірки регулярної мережі,  $d_{\min}$  — відстань для максимальної потужності,  $N_{\min}$  — кількість точок доступу в області обмеженій  $d_{\min}$ ;

$$M = 2 \cdot \text{roundup} \left( \frac{d_{\max}}{CL} \right) \quad (2.13)$$

де  $M$  — розмірність регулярної мережі,  $d_{\max}$  — відстань для мінімальної потужності. Відстані розраховуються на основі моделі розповсюдження радіохвиль [39].

Центром накладання регулярної мережі є початкове положення об'єкта  $A_0$ . Завершальною частиною підготовки до роботи алгоритму є розміщення всіх станцій до відповідних комірок мережі.

Робота алгоритму починається з наступного сканування сигналів. Метою є визначення напрямку руху та наближення розташування об'єкта до одного з вузлів регулярної мережі. Виділяються такі кроки алгоритму:

1. Розрахувати вагу всіх вузлів регулярної мережі.
2. Знайти вузли з максимальною вагою.
3. Розрахувати розташування об'єкта, використовуючи сторонню систему позиціонування, виходячи з даних про комірки, що оточують обрані вузли.

До переваг даного алгоритму, призначеного для покращення, можна віднести простоту реалізації. До недоліків можна зарахувати необхідність використання сторонніх систем позиціонування. Алгоритм є ефективним для позиціонування об'єктів, що переміщуються з невисокою швидкістю, проте, необхідна значна кількість ітерацій для підвищення точності позиціонування.

## **2.2 Методи оцінки координат**

Методи що розглянуто в підрозділі 1.4 дозволяють визначити відстань до об'єкта, проте для можливості коректного відображення положення об'єкта в додатку, необхідно знати його координати з високою точністю. Серед розглянутих алгоритмів в підрозділі 2.1 перспективним являється латерация. Тому далі розглянуто методи оцінки які можливо застосувати для рівнянь даного методу.

### 2.2.1 Метод сферичного перетину

Виходячи з того що похибка рівнянь може бути представлена як  $A \cdot \omega - b - R \cdot r$ . До оцінки положення об'єкта застосовується критерій мінімуму її квадратичної форми, вважаючи що  $r$  параметр:

$$\omega_s = \arg \min \left[ (A \cdot \omega - b - R \cdot r)^T (A \cdot \omega - b - R \cdot r) \right] \quad (2.14)$$

де  $A$  — матриця  $n \times 3$ ,

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ \dots & \dots \\ x_i & y_i \end{bmatrix};$$

$\varphi$  — вектор  $3 \times 1$ ,

$$\omega = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix};$$

$b$  — вектор  $n \times 1$ ,

$$b = \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 - (r_1^2 - r_0^2) \\ \dots \\ x_i^2 + y_i^2 - (r_i^2 - r_0^2) \end{bmatrix}.$$

Гradient функції, що знаходиться в правій частині (2.24) прирівнюється нулю  $\nabla \omega \left[ \omega^T A^T A \omega - 2 \omega^T A^T (b + R \cdot r) + (b + R \cdot r)^T (b + R \cdot r) \right] = 0$ , та отримується аналітичне рішення, що залежить від  $r$ :

$$\omega(r) = (A^T A)^{-1} A^T (b + R \cdot r) \quad (2.15)$$

Підставляючи  $\omega(r)$  в квадратичний зв'язок  $r^2 = \omega^T \omega = x^2 + y^2$  отримуємо:

$$\begin{aligned} r^2 &= \omega(r)^T \omega(r) = (A^T A)^{-1} A^T (b + R \cdot r)^T (A^T A)^{-1} A^T (b + R \cdot r) = \\ &= (b + R \cdot r)^T H (b + R \cdot r) = b^T H \cdot b + 2 R^T r \cdot H \cdot b + R^T r^2 H \cdot R \end{aligned} \quad (2.16)$$

де  $H = A (A^T A)^{-2} A^T$

звідки маємо квадратне рівняння відносно  $r$ :

$$(1 - R^T H \cdot R) r^2 - 2R^T H \cdot b \cdot r - b^T H \cdot b = 0, r \geq 0. \quad (2.17)$$

Підстановка рішення (2.17) в (2.15) і дає оцінку положення методом сферичного перетину.

Для оцінки методів виконано статистичне моделювання в середовищі MATLAB в приміщенні, яке має такі параметри: довжина — 10 метрів; ширина — 10 метри. З початком координат по центру кімнати. Конфігурація розташування Bluetooth beacon:  $B_1(-5; -5)$ ,  $B_2(0; 5)$ ,  $B_3(5; -5)$ . Місцеположення об'єкта задається з проміжком 1 метр, впродовж осі x (рис. 2.6).

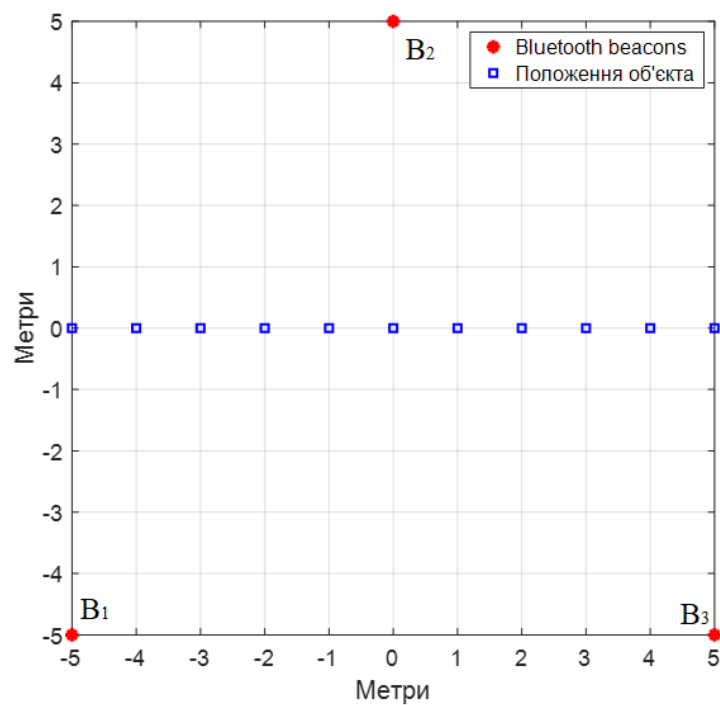


Рис. 2.6. Конфігурація розташування Bluetooth beacon та місцеположення об'єкта

Похибка вимірювання потужності маяками  $\sigma = 0.5$  дБм. В якості показника ефективності використано кругове середнє квадратичне відхилення (СКВ)  $\hat{\sigma} = \sqrt{\text{tr}(\hat{P})}$ .

На рисунку 2.7 відображено показники середнього квадратичного відхилення (СКВ)  $\hat{\sigma}^{МК}$  похибки оцінки положення об'єкта, отримане методом Монте-Карло



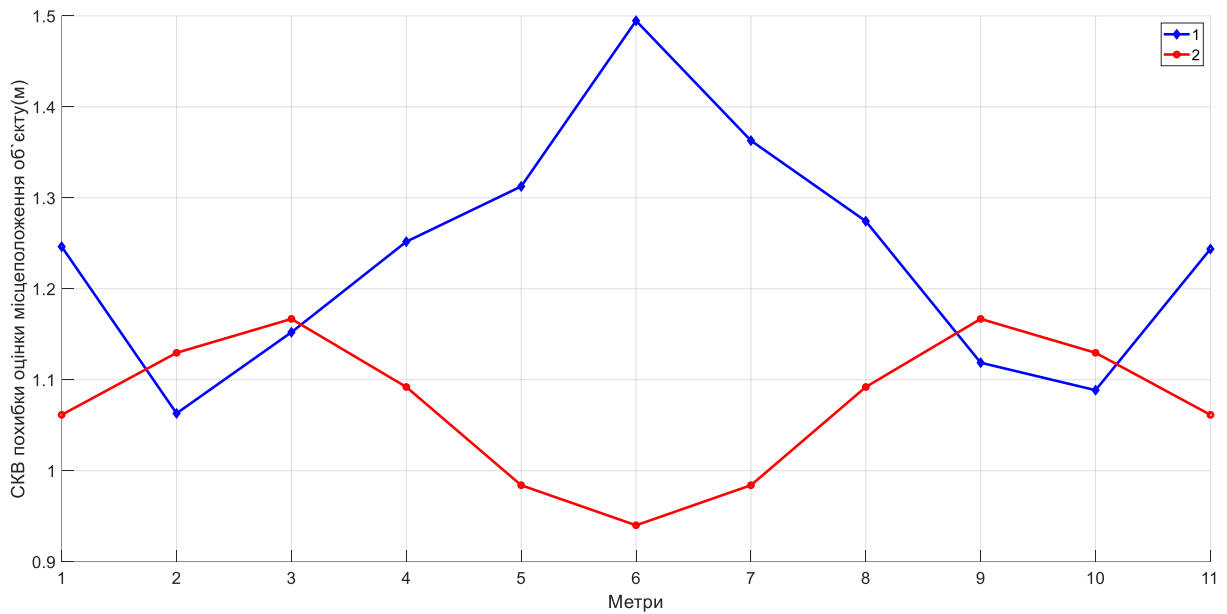


Рис. 2.7. СКВ похибки оцінки положення об'єкта для сферичного перетину де 1 — СКВ  $\hat{\sigma}^{МК}$  похибки оцінки положення об'єкта при розрахунку сферичним перетином  
2 — СКВ  $\hat{\sigma}_{НГРК}$  яке відповідає нижній границі Рао-Крамера

### 2.2.2 Метод сферичної інтерполяції (метод найменших квадратів)

За формулюванням Абеля та Сміта, рішення (2.15) лінійно залежить від параметра  $r$ . Це дає можливість отримати аналітичне рішення для  $r$  підставляючи його в квадратичний критерій(2.14):

$$\bar{r} = \arg \min \left[ (S(b + R \cdot r))^T (S(b + R \cdot r)) \right],$$

де  $S = A(A^T A)^{-1} A^T - I$ ,

$I$  — одинична матриця

Оскільки  $S^2 = S$ , то отримуємо:

$$\bar{r} = \arg \min \left[ b^T S \cdot b + 2R^T r \cdot S \cdot b + R^T r^2 S \cdot R \right] = -\frac{R^T S \cdot b}{R^T S \cdot R}$$

Підстановка оцінки  $\bar{r}$  в (2.15), приводить до рішення сферичною інтерполяцією по Абелю та Сміту.

Для такої самої конфігурації Bluetooth маяків (рис 2.6) виконано моделювання з оцінкою координат методом сферичної інтерполяції (рис 2.8)

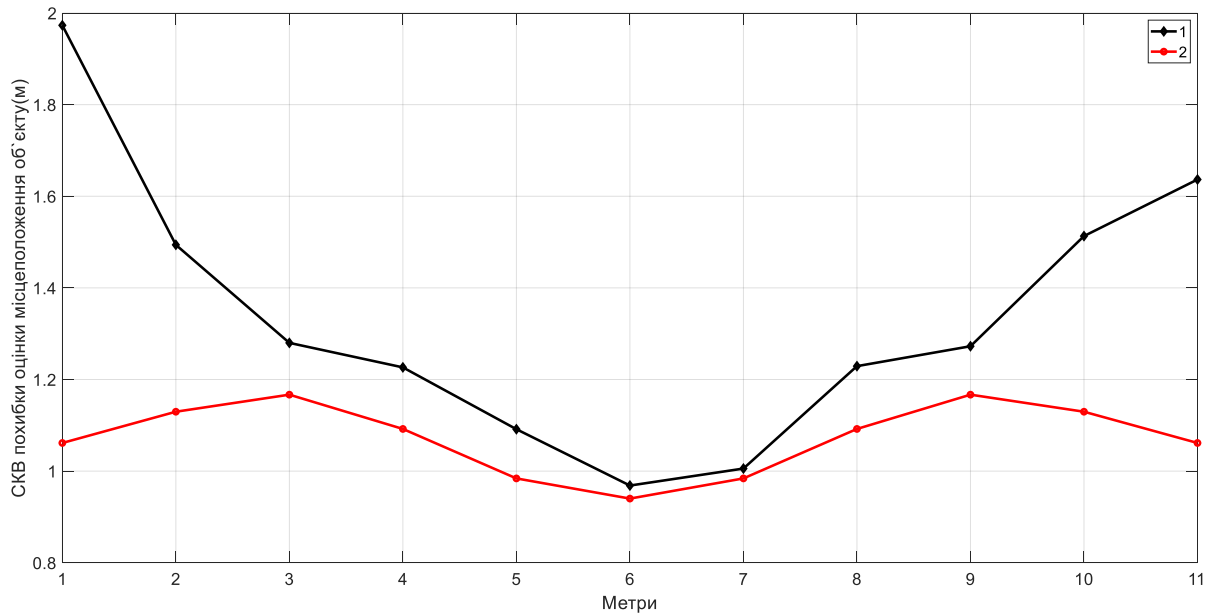


Рис. 2.8. СКВ похибки о оцінки положення об'єкта для сферичної інтерполяції

- де 1 — СКВ  $\hat{\sigma}^{МК}$  похибки оцінки положення об'єкта при розрахунку сферичною інтерполяцією  
 2 — СКВ  $\hat{\sigma}_{НГРК}$  яке відповідає нижній границі Рао-Крамера

### 2.3 Висновки по розділу

Розглянуто вісім алгоритмів позиціонування, серед яких для вирішення задачі позиціонування в приміщенні за допомогою Bluetooth технології на базі RSS виміру дальності найкраще підходить латерація.

Виконано моделювання розв'язку рівнянь геометричного підходу латерації методами сферичного перетину та сферичної інтерполяції. Метод сферичної інтерполяції для даної конфігурації розташування Bluetooth beacon на більшості точок шляху має СКВ похибки оцінки місцеположення об'єкта більш наближене до НГРК.

## Розділ 3 Розроблення алгоритму позиціонування об'єкту на основі технології Bluetooth beacon

Алгоритм визначення положення об'єкту починається із визначення дальності за допомогою методу RSS за яким у відповідності до формули (1.13) відстань визначається як:

$$r_i = r_0 \cdot 10^{\frac{P_0 - P_i + v_i}{10 \cdot a}} \quad (3.1)$$

### 3.1 Оцінка координат

Наступним кроком після визначення дальності до найближчих маяків являється оцінка координат об'єкта, для чого вирішується система рівнянь отримана за геометричним підходом латерації.

Для вирішення системи рівнянь кругової латерації виконуються наступні кроки:

$$\begin{cases} r_1^2 = x^2 - 2xx_1 + x_1^2 + y^2 - 2yy_1 + y_1^2 \\ \dots \\ r_i^2 = x^2 - 2xx_i + x_i^2 + y^2 - 2yy_i + y_i^2 \end{cases} \quad (3.2)$$

Оскільки  $r^2 = x^2 + y^2$  запишемо систему рівнянь так

$$\begin{cases} r_1^2 = r^2 - 2xx_1 + x_1^2 - 2yy_1 + y_1^2 \\ \dots \\ r_i^2 = r^2 - 2xx_i + x_i^2 - 2yy_i + y_i^2 \end{cases} \quad (3.3)$$

Далі система множиться на (-1) та ділиться на 2 і приймає такий вид

$$\begin{cases} x_1x + y_1y - \frac{1}{2}r^2 = \frac{1}{2}(x_1^2 + y_1^2 - R_1^2) \\ \dots \\ x_ix + y_iy - \frac{1}{2}r^2 = \frac{1}{2}(x_i^2 + y_i^2 - R_i^2) \end{cases} \quad (3.4)$$

Що записується в матричному вигляді

$$\begin{vmatrix} x_1 & y_1 & -\frac{1}{2} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_i & y_i & -\frac{1}{2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x \\ y \\ r^2 \end{vmatrix} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} x_1^2 + y_1^2 - r_1^2 \\ \dots \\ x_i^2 + y_i^2 - r_i^2 \end{vmatrix} \quad (3.5)$$

Який розв'язується основним рівнянням МНК:

$$\omega = 0.5(A^T A)^{-1} A^T b \quad (3.6)$$

Для вирішення системи рівнянь гіперболічної латерації необхідно використовувати систему з нульовим, опорним маяком для нівелювання некорельованих помилок. Така система рівнянь розв'язується в такому порядку:

$$\begin{cases} r_1 = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \\ \dots \\ r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\begin{cases} r_0^2 = x^2 - 2xx_0 + x_0^2 + y^2 - 2yy_0 + y_0^2 \\ \dots \\ r_i^2 = x^2 - 2xx_i + x_i^2 + y^2 - 2yy_i + y_i^2 \end{cases} \quad (3.8)$$

На цьому етапі від  $i$ -того рівняння віднімається нульове:

$$r_i^2 - r_0^2 = -2xx_i + 2xx_0 + x_i^2 - x_0^2 - 2yy_i + 2yy_0 + y_i^2 - y_0^2 \quad (3.9)$$

В результаті чого утворюється система з рівнянь виду:

$$2x(x_0 - x_i) + 2y(y_0 - y_i) = -x_i^2 + x_0^2 - y_i^2 + y_0^2 + (r_i^2 - r_0^2) \quad (3.10)$$

де  $x_0, y_0 = 0$ .

Для приведення системи в матричний вид рівняння множаться на (-

1) та діляться на 2, в наслідок чого при відповідних перетвореннях отримано:

$$\begin{vmatrix} x_1 & y_1 \\ \dots & \dots \\ x_i & y_i \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x \\ y \end{vmatrix} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} x_1^2 + y_1^2 - (r_1^2 - r_0^2) \\ \dots \\ x_i^2 + y_i^2 - (r_i^2 - r_0^2) \end{vmatrix} \quad (3.11)$$

За аналогією до кругової латерації розв’язок знаходиться за допомогою основного рівняння методу найменших квадратів (3.6).

### 3.2 Моделювання алгоритму

Алгоритм перевірено за допомогою моделювання, яке проведено в середовищі MATLAB в приміщенні, яке має такі параметри: довжина — 100 метрів; ширина — 3 метри. Конфігурація розташування Bluetooth beacon:  $B_1(0; 0)$ ,  $B_2(12.5; 3)$ ,  $B_3(25; 0)$ ,  $B_4(37.5; 3)$ ,  $B_5(50; 0)$ ,  $B_6(62.5; 3)$ ,  $B_7(75; 0)$ ,  $B_8(87.5; 3)$ ,  $B_9(100; 0)$ . Місцеположення об’єкта задається з проміжком 1 метр, впродовж всього приміщення (рис. 1).

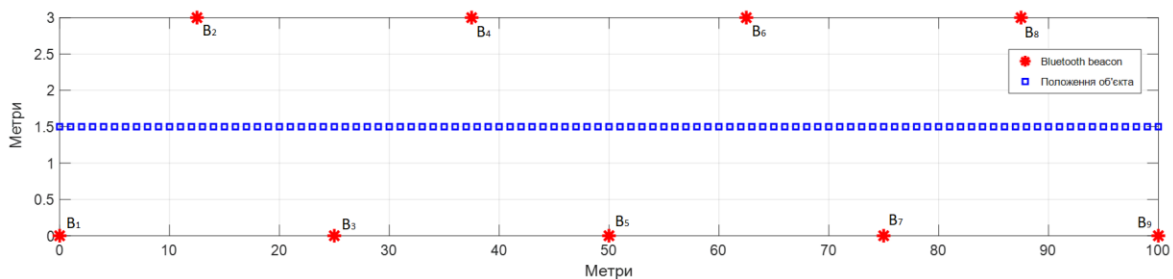


Рис. 3.1. Конфігурація розташування Bluetooth beacon та місцеположення об’єкта

При розрахунку на основі методу МНК для кругової латерації фактичне кругове СКВ  $\hat{\sigma}^{МК}$  (рис. 3.2 крива 1) похибки оцінки положення об’єкта, отримане методом Монте-Карло при розрахунку з використанням всіх датчиків приймає значення в межах від 15 до 70 метрів, що є значно більшим за значення СКВ  $\hat{\sigma}_{НГРК}$ , яке відповідає нижній границі Рао-Крамера (НГРК), яка характеризує потенційно можливу точність визначення координат об’єкта (крива 2).

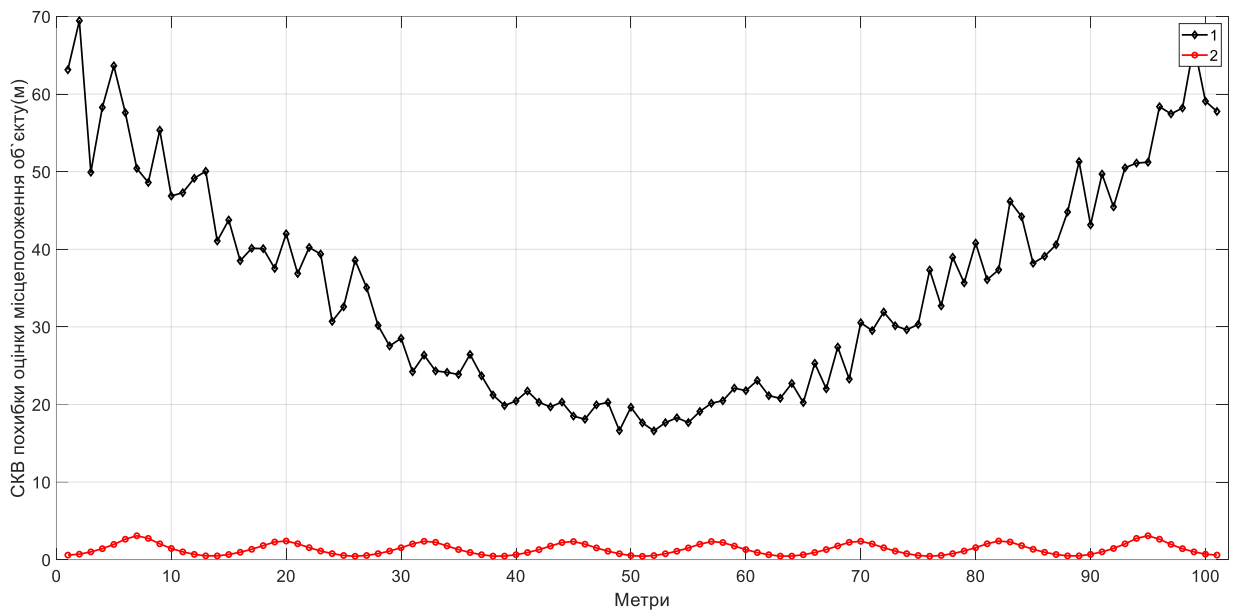


Рис. 3.2. СКВ похибки оцінки положення об'єкта для МНК

### 3.3 Критерій відбору по дальності

Як було розглянуто в тезисах (Додаток А) при конфігурації з великою кількістю Bluetooth маяків похибка в великих приміщеннях значно збільшується, через похибку що вноситься дальніми маяками, тому для усунення даної проблеми виведено критерій відбору дальності що враховуються при розрахунку по рівню потужності прийнятого сигналу.

Для кожної нової конфігурації системи даний критерій необхідно розраховувати окремо, визначається він за діагоналлю прямокутника максимально приближеного по формі до квадрата, в площі якого знаходиться щонайменше три та не більше чотирьох Bluetooth маяків, при умові рівномірного розміщення маяків в кімнаті. Розрахунок критерію виконується за моделлю поширення, що враховує тільки загасання сигналу та має вигляд:

$$P = P_0 - 10 \cdot a \cdot \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) + 2, \quad (3.12)$$

де  $P$  — критерій мінімальної прийнятої потужності;

$P_0$  — потужність сигналу на відомій відстані  $r_0$ ;

$a$  — коефіцієнт загасання в середовищі;

$r$  — діагональ прямокутника;

Приклади конфігурацій відображені на рисунках 3.3 та 3.5. Відповідні до них порівняння ефективності розрахунку методом найменших квадратів відображені на рисунках 3.4 та 3.6.

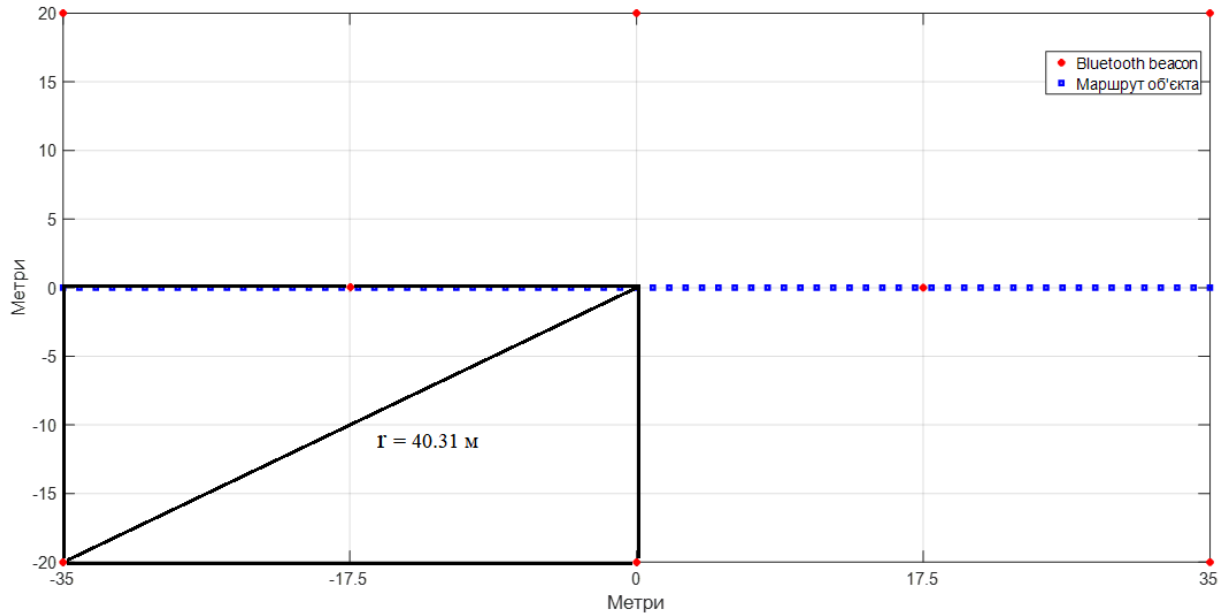


Рис. 3.3. Конфігурація 1

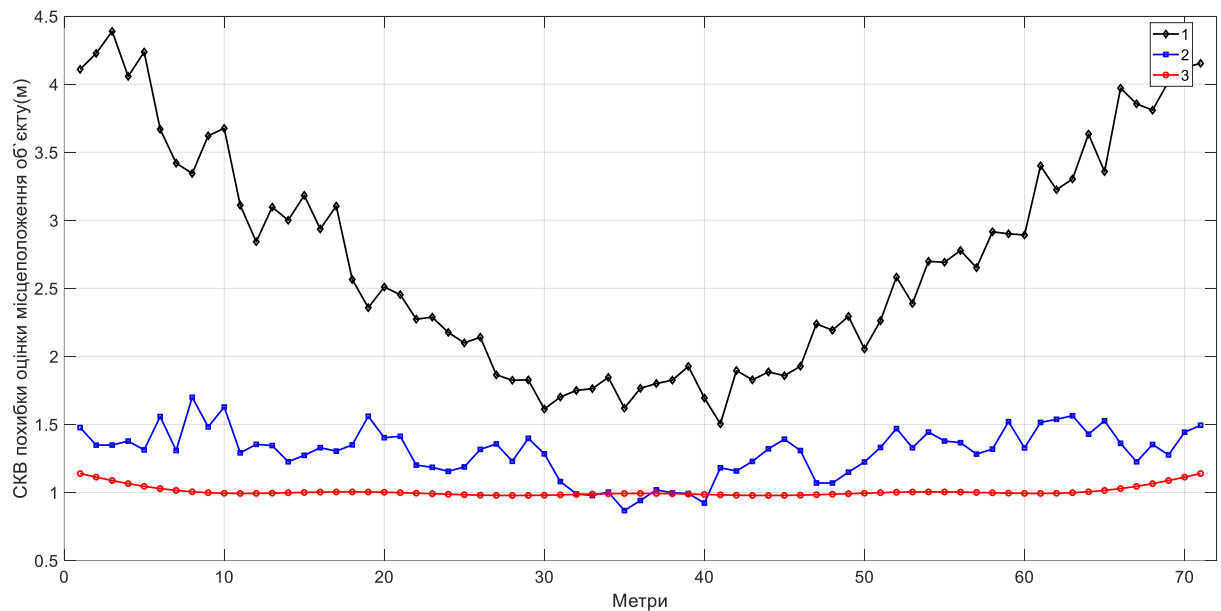


Рис. 3.4. Порівняння СКВ похибки оцінки положення об'єкта для конфігурації 1

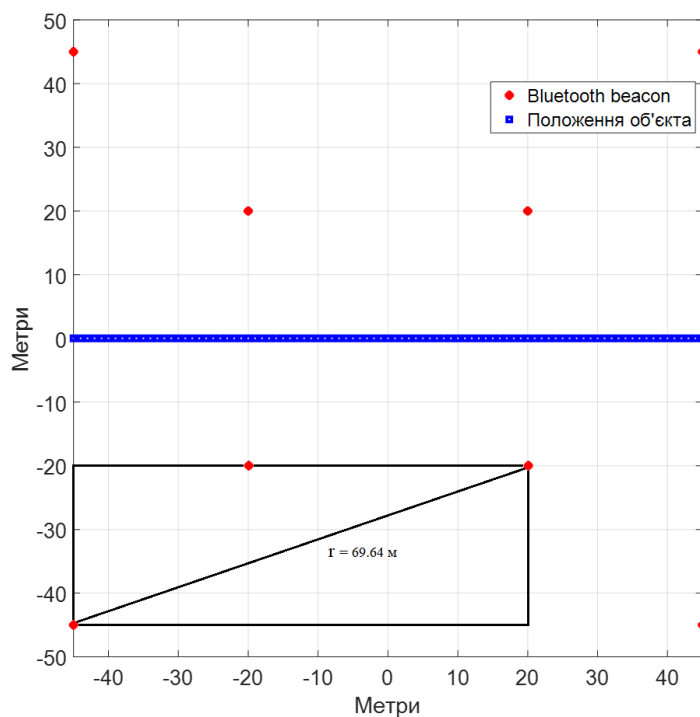


Рис. 3.5. Конфігурація 2

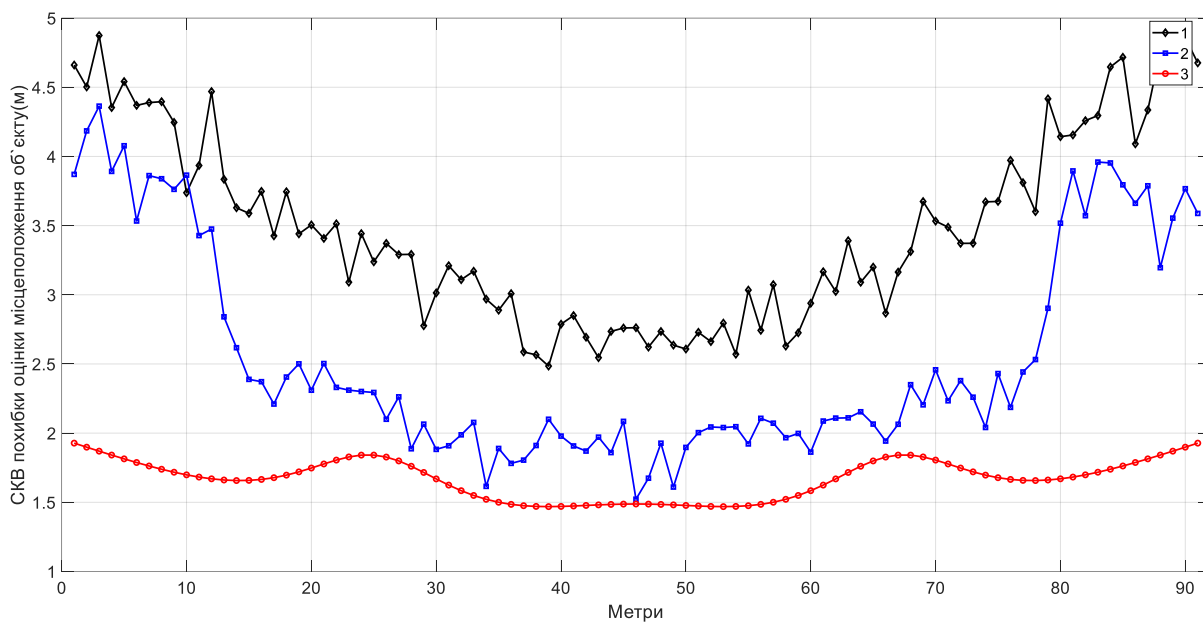


Рис. 3.6. Порівняння СКВ похибки оцінки положення об'єкта для конфігурації 2

Для конфігурації що розглядалась на початку підрозділу  $r = 25.17$  м що відповідає критерію  $P \geq -82$  дБм. Як видно з рисунку 3.7, вдалось досягти



значень СКВ  $\hat{\sigma}^{МК}$  (рис. 3.7 крива 2) похибки оцінки положення об'єкта від 3 до 8 метрів, що є покращенням результату більш ніж у 5 разів

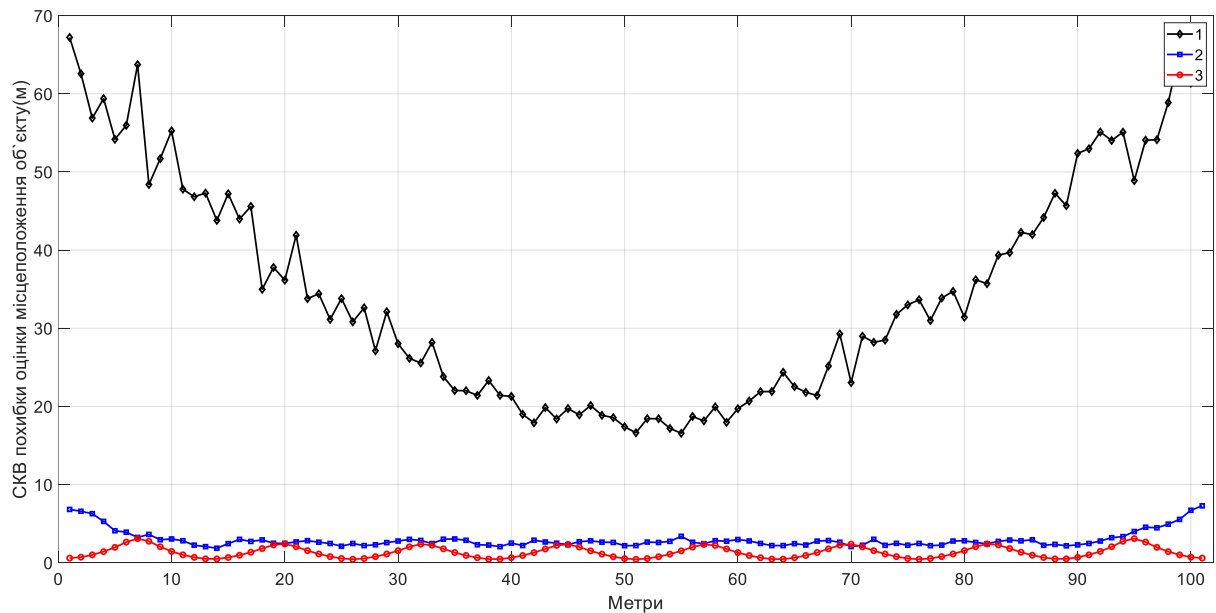


Рис. 3.7. Порівняння СКВ похибки оцінки положення об'єкта

Для тієї ж конфігурації приміщення виконано моделювання за розробленим алгоритмом для оцінки координат методом сферичного перетину (Рис 3.8 крива 3). Що виявило однозначну перевагу методу найменших квадратів, що проявляється в більш стабільному діапазоні значень, наближених до СКВ  $\hat{\sigma}_{НПК}$  нижньої границі Рао-Крамера.

Тому також виконано аналогічне моделювання для алгоритму на основі МНК для рівнянь гіперболічної латерації, відмінність конфігурації полягає в наявності нульового маяка що було розміщено за координатами  $V_0(50 \ 1.5)$ , який при даному розрахунку являвся початковою точною відліку координат. Отриманий результат відображено на рисунку 3.8 крива 2. Отримані значення виявились стабільними, проте в середньому на 1-2 метри гіршими за показники МНК за рівняннями кругової латерації.

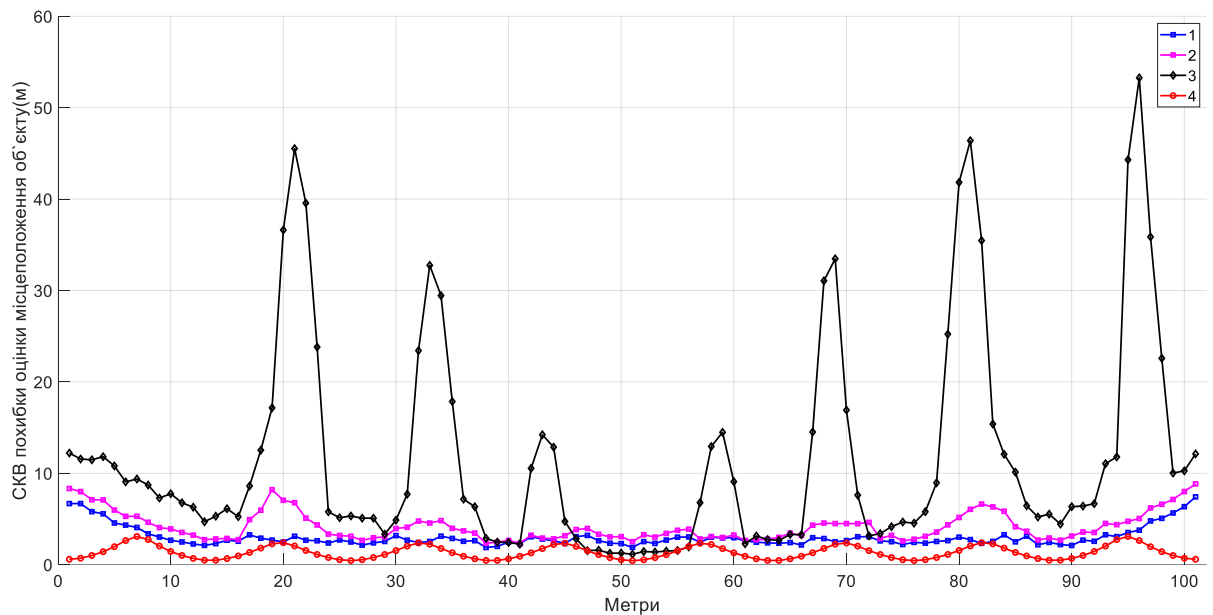


Рис. 3.8. СКВ похибки оцінки положення об'єкта за розробленим алгоритмом де 1 — СКВ  $\hat{\sigma}^{МК}$  похибки оцінки положення об'єкта при розрахунку за алгоритмом МНК кругової латерації  
 2 — СКВ  $\hat{\sigma}^{МК}$  похибки оцінки положення об'єкта при розрахунку за алгоритмом МНКгіперболічної латерації  
 3 — СКВ  $\hat{\sigma}^{МК}$  похибки оцінки положення об'єкта при розрахунку за алгоритмом методом сферичного перетину  
 4 — СКВ  $\hat{\sigma}_{НГРК}$  яке відповідає нижній границі Рао-Крамера

### 3.4 Висновки по розділу

Розроблено алгоритм локального позиціонування об'єкту на основі технології Bluetooth beacon за допомогою RSS вимірювань та оцінкою координат методом найменших квадратів для приміщень з урахуванням критерію мінімальної прийнятої потужності.

Виведено принцип визначення критерію мінімальної прийнятої потужності, який дозволяє зменшити СКВ похибки визначення положення об'єктів, для розглянутої конфігурації більш ніж у 5 разів та майже досягає нижньої границі Рао-Крамера.

## Розділ 4 Практична реалізація алгоритмів позиціонування

### 4.1 RaspberryPi в якості Bluetooth маяка

Для реалізації системи на базі технології Bluetooth зазвичай використовуються BLE маяки, які продаються в вільному доступі та в великому асортименті. Проте за наявності мікрокомп'ютера RaspberryPi з відповідним модулем, його можливо запрограмувати для виконання функціоналу маяка. Оскільки необхідна для проведення експерименту кількість мікрокомп'ютерів була в наявності, саме їх було застосовано як маяки(рис 4.1).

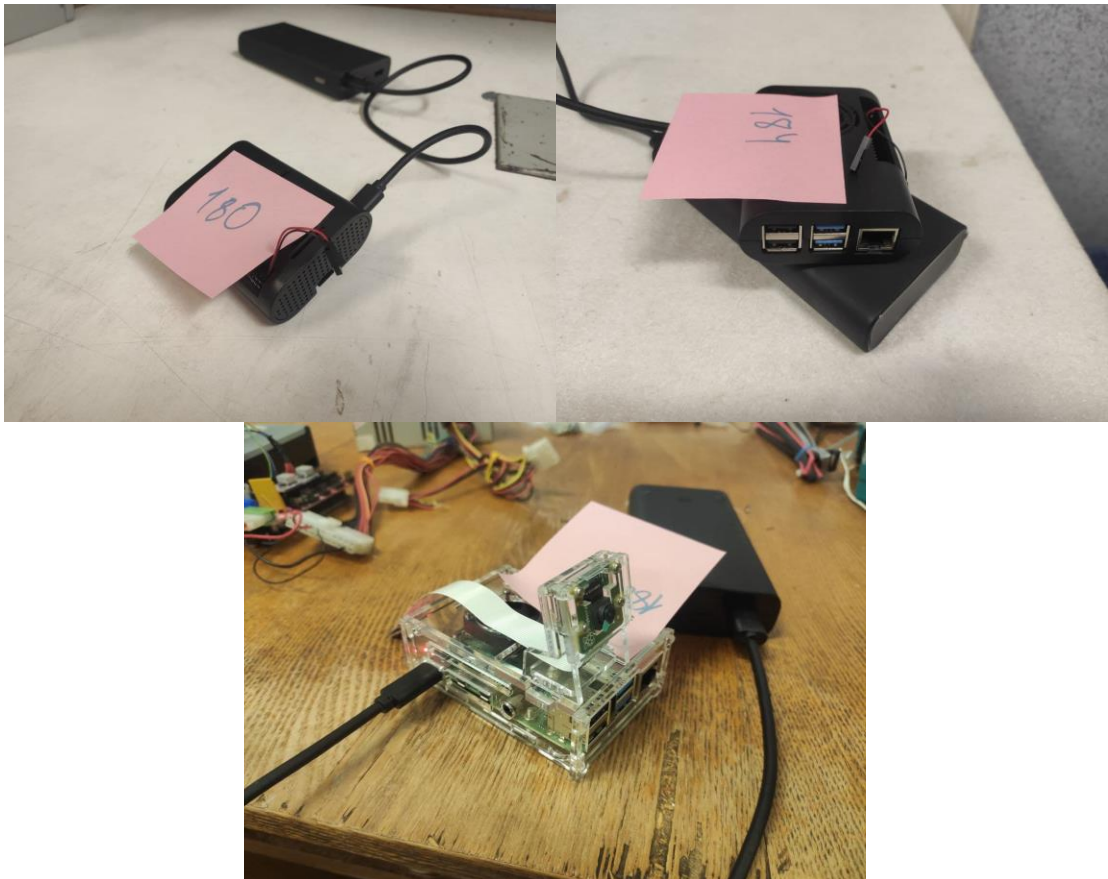


Рисунок 4.1 — Задіяні мікрокомп'ютери

Щоб мікрокомп'ютер RaspberryPi виконував функції маяка в першу чергу необхідно під'єднати BLE модуль, для чого необхідно встановити деякі бібліотеки:

```
sudo apt-get install libusb-dev libdbus-1-dev libglib2.0-dev libudev-dev libical-dev libreadline-dev
```

Після чого встановлюється Bluez, який являється стеком Bluetooth для Linux:

```
sudo mkdir bluez cd bluez sudo wget www.kernel.org/pub/linux/bluetooth/bluez-5.11.tar.xz
```

Після завантаження виконуються його збірка та встановлення:

```
sudo unxz bluez-5.11.tar.xz sudo tar xvf bluez-5.11.tar cd bluez-5.11 sudo ./configure --disable-systemd sudo make sudo make install
```

Після підключення BLE модуля необхідно налаштувати мікрокомп'ютер для мовлення, для чого виконуються команди:

```
sudo tools/hciconfig hci0 up sudo tools/hciconfig hci0 leadv 3 sudo tools/hciconfig hci0 noscanc
```

Далі налаштовується ідентифікація пристрою, для чого вводиться наступна строчка, де третій з кінця байт відповідає номеру мінору:

```
sudo hcitool -i hci0 cmd 0x08 0x0008 1E 02 01 1A 1A FF 4C 00 02 15 E2 0A 39 F4 73 F5 4B C4 A1 2F 17 D1 AD 07 A9 61 00 00 00 00 C8 00
```

Цим створюється пакет даних у шістнадцятковому форматі, сегменти якого відображені на (рис. 4.2)

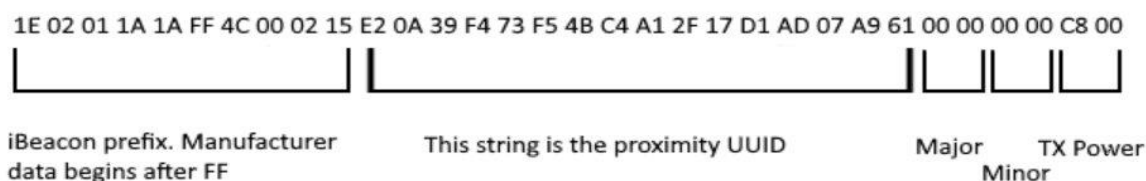


Рисунок 4.2 — Структура пакету Bluetooth маяка

Префікс завжди буде однаковим, після знаку FF складається з 4 байтів. Два байти виділено на інформацію про виробника, в нашому випадку пристрій ідентифікується як iBeacon, один для визначення типу пакету, та останній для інформації про довжину пакету даних.

Далі іде основна частина ідентифікатору, UUID (Universally Unique Identifier) який займає 16 байт може бути присвоєним до декількох маяків в зоні дії. Після чого по 4 байти виділено на Major та Minor частини які виконують роль ідентифікаторів з однаковими UUID та Major частинами відповідно. Так отримується унікальний ідентифікатор за яким в базі даних знаходяться його координати для розрахунку.

Остання частина, TX займає 2 байти та відображає значення вимірної потужності на відстані одного метру. Перший біт в ньому знаковий, 1 — «-», 0 — «+». Значення для цієї частини зазвичай вимірюється 1 раз та більше не змінюється.

## 4.2 Виміри

Перший етап експерименту вирішено було провести в кімнаті, приблизні розміри якої 6 на 6 метрів, для локальної системи координат, точкою відліку обрано центр кімнати, конфігурація розташування Bluetooth маяків:  $V_1(-0.85; 1.63)$ ,  $V_2(-0.6; -2.81)$ ,  $V_3(2.20; -0.48)$ . Координати маяків визначались за допомогою лазерної рулетки Положення маяків та маршрут вздовж якого проводились виміри зображено на рисунку 4.3.



Рисунок 4.3 — Конфігурація розташування Bluetooth маяків та траєкторія руху

Вимір прийнятої потужності маяків здійснювався за допомогою додатку на смартфоні «Beacon Scanner» інтерфейс якого зображено на рисунку 4.4. Отримані показники надсилались на сервер Node.js для логування, звідки зчитувались в реальному часі на HTML сторінку на яку виводились значення прийнятої потужності, розраховані відстані до маяків за методом RSS і внутрішнім алгоритмом маяка та розраховане положення. Лістинг коду сторінки HTML де виконувався розрахунок приведено у додатку Б.

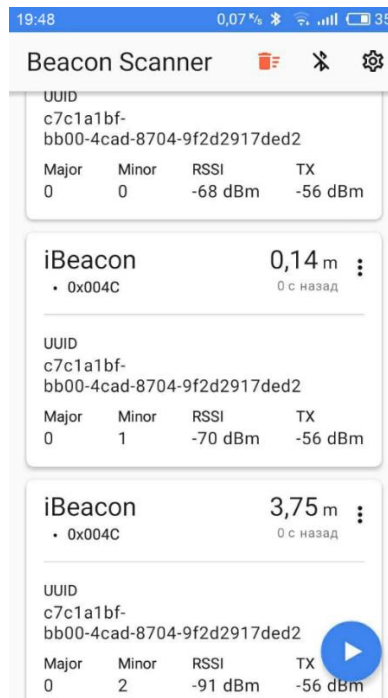


Рисунок 4.4 — Інтерфейс додатку «Beacon Scanner»

Для побудови графіку із логу витягнуто значення для 18 точок виміру, положення яких в координатній сітці визначалось, як і положення маяків, за допомогою лазерної рулетки та відображено на рисунку 4.5.

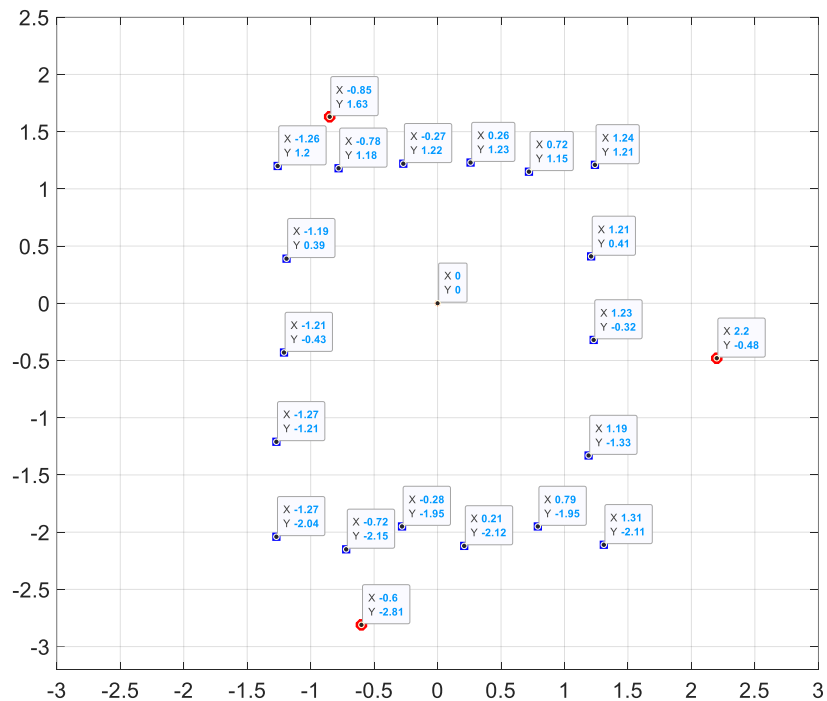


Рисунок 4.5 — Задіяні точки маршруту та положення маяків

Оскільки в попередньому розділі було визначено найкращим методом МНК, розрахунок при експерименті проводився тільки для нього. Для можливості оцінити похибку при визначенні положення в кожній точці проводилось по 10 вимірів.

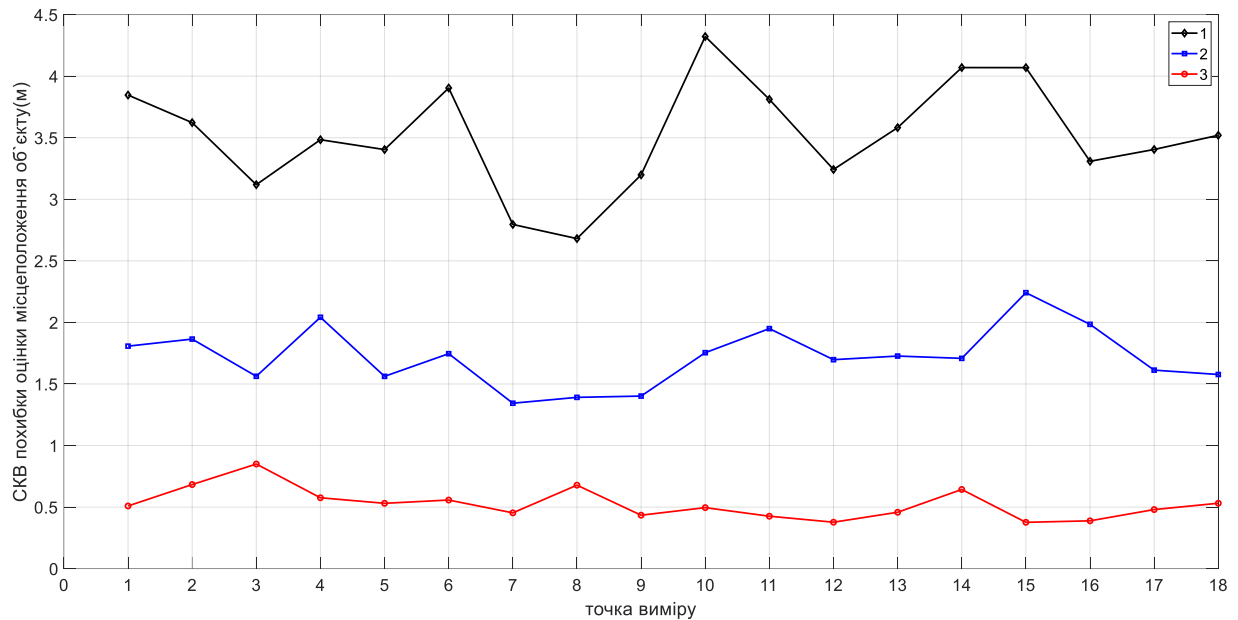


Рис. 4.6. Порівняння СКВ похибки оцінки положення об'єкта

де 1 — СКВ  $\hat{\sigma}^{МК}$  похибки визначення місцеположення об'єкта отримане при експерименті

2 — СКВ  $\hat{\sigma}^{МК}$  похибки визначення місцеположення об'єкта отримане статистичним моделюванням

3 — СКВ  $\hat{\sigma}_{НГРК}$  яке відповідає нижній границі Рао-Крамера

### 4.3 Висновки по розділу

При практичних вимірах на першому етапі експерименту зафіксовано значні похибки в порівнянні з теоретичними результатами, це являється наслідком перевідбиття та накладання сигналів маяків одне на одного, що не враховувалось в теоретичній моделі. Через що виміри для більш складної конфігурації розташування Bluetooth beacon вирішено не проводити. Для усунення даної проблеми необхідний опис більш складної моделі поширення сигналу, яка враховує перевідбиття сигналів.



## Розділ 5 Розроблення стартап проекту

В даному розділі виконано аналіз ідеї в області маркетингу по конкурентоспроможності та потенціалі виходу на ринок з ідеєю на основі розглянутої теми

### 5.1 Опис ідеї проекту

Короткий опис змісту, напрямків застосування та вигоди від ідеї наведено в таблиці 5.1

Таблиця 5.1 - Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Точне позиціонування в приміщенні	1. Маркетинг	Таргетована реклама
	2. транспортна сфера	Орієнтування в складних будівлях аеропортів або вокзалів
	3. промисловість	Відстеження положення вантажів на складах
	4. охорона здоров'я	Можливість в терміновій ситуації лікарю знайти пацієнта

Виконано аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї за моделлю М. Портера. Оскільки прямих конкурентів в даній сфері немає, для порівняння обрано компанії що надають послуги схожого характеру, а саме «Smart Vision» та «RFID Ukraine». Все це наведено в таблиці 5.2

Таблиця 5.2 - Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент 1	Конкурент 3			
1	Доступ до ресурсів	Імпорт з інших країн	Імпорт з інших країн	Імпорт з інших країн		+	
2	Розмір капіталовкладень	Невеликі	Великі	Великі	+		

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент 1	Конкурент 3			
3	Точність	Висока	Помірна	Помірна			+
4	Швидкодія	Висока	Низька	Помірна			+
5	Контроль якості	Поки що немає відповідного контролю	Високий	Високий	+		
6	Постійні витрати	Середні	Дуже високі	Високі		+	
7	Переваги у затратах виробництва	Низькі	Високі	Високі			+

## 5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

При технічному аудиті розглядаються необхідні технології для реалізації та доступність даних технологій, що наведено в таблиці 5.3

Таблиця 5.3 - Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Система з підвищеною точністю визначення місцеположення	Алгоритм розрахунку місцеположення	Наявна	Так
2		Оброблення даних	Наявна	Так
3		Взаємодія з базою даних	Потрібно розробити	Так
4		Відображення оброблених даних	Потрібно розробити	Так
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Застосування розробленого алгоритму				

Даний проект технологічно можливо реалізувати

### 5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Для визначення ринкових можливостей проведено аналіз попиту що наведено в таблиці 5.4

Таблиця 5.4 - Попередня характеристика потенційного ринку стартап проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	0
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	невідомо
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стагнує
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Необхідні ліцензії, дозволи
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Необхідно дотримуватись якості продукції
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	Невідомо

Ринок є достатньо привабливим, при умові якісної розкрутки теми не розповсюдженої на ринку

Цільовою групою по збуту систем позиціонування будуть торговельні центри, вокзали, склади, продаж в місцеві організації. Характеристика потенційних клієнтів наведена в табл. 5.5

Таблиця 5.5 - Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Точні системи позиціонування для визначення місцезнаходження в приміщенні	Торговельні центри Вокзали Склади Лікарні	Напрямок застосування системи.	Продукція має відповідати нормам, Компанія-постачальник повинна представити дозволи та ліцензію на встановлення

Складено таблиці факторів загроз(табл. 5.6) та можливостей(табл. 5.7) для потенційного проекту які включають реакцію компаній.

Таблиця 5.6 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Якість системи	Система не відповідатиме заявленим вимогам та характеристикам	Додаткова перевірка роботи системи що встановлюється

Таблиця 5.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Унікальність	Для кожного закладу окремо розроблюється система позиціонування	Детальне вивчення впливу середовища на систему

Далі проведено аналіз пропозиції, з визначенням загальних рис конкуренції на ринку (табл. 5.8).

Таблиця 5.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
Чиста	Відсутність конкурентів	Дії не потрібні оскільки конкурентів немає
Локальний	Системи пропонуються лише для певних підприємств	
Міжгалузєва	Продукт може використовуватись в різних цілях	
Цінова	Вартість системи змінюється в залежності від розміру приміщення де необхідно проводити позиціонування	
Марочна	Має бути сформована марка для розширення аудиторії.	

Основним фактором конкурентоспроможності потенційної системи є вільний ринок, та унікальність системи що пропонується

Для узагальнюючого порівняння виконано SWOT-аналіз, в якому наведено потенційні можливості системи(табл. 5.9)

Таблиця 5.9 — SWOT-аналіз стартап-проекту

<b>Сильні сторони:</b> Простота, Велика точність	<b>Слабкі сторони:</b> Розмір капіталовкладень Невідома компанія
<b>Можливості:</b> Розширення функціоналу Нові технології	<b>Загрози:</b> Не відповідність нормам Не стабільність системи

#### 5.4 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Для побудови маркетингової програми розроблена трирівнева модель(табл 5.10) товару, для уточнення ідеї проекту та його параметрів.

Таблиця 5.10 — Три-рівнева маркетингова модель

Рівні товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом	Система задовольняє потребу в навігації всередині великих та заплутаних будівель
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики
	1. Нові способи відтворення результатів. 2. Зниження вартості більш точного виміру відстані
	Якість: стандарти, нормативи, параметри тестування то-що
	Пакування
	Марка: назва організації-розробника + назва товару
III. Товар із підкріпленням	До продажу — рівень розробки
	Після продажу — система із розробленим алгоритмом

За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Захист інтелектуальної власності
---

## **5.5 Висновки до розділу**

Потенційна система забезпечує високу точність позиціонування об'єктів в приміщенні, проте є ряд факторів, які негативно вплинуть на вихід на ринок. По перше недосконалість алгоритму що дає можливість крупній компанії створити кращу систему яка витисне малий бізнес з ринку. Тому до виходу на ринок необхідно доопрацювати засоби боротьби з перевідбиттям сигналів. Для вирішення цієї задачі необхідна команда розробників і залучення інвесторів.

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання магістерської дисертації виконано удосконалення алгоритму локального позиціонування об'єкта на основі технології Bluetooth beacon.

Основні наукові і практичні результати роботи полягають в наступному:

1. Виконано аналіз та порівняння існуючих методів визначення дальності та технологій позиціонування, та складено відповідність доступності методів до технологій локального позиціонування.

2. Проведено аналіз існуючих методів та алгоритмів позиціонування об'єктів на основі технології Bluetooth beacon з використанням RSS вимірювань. Виконано статистичне моделювання, яке показало що для розрахунку координат найкраще підходить метод найменших квадратів.

3. Розроблено алгоритм локального позиціонування об'єкту на основі технології Bluetooth beacon за допомогою RSS вимірювань з урахуванням критерію мінімальної прийнятої потужності сигналу. Виконано статистичне моделювання на EOM.

4. Описано принцип визначення критерію мінімальної прийнятої потужності сигналу, який дозволяє зменшити СКВ похибки визначення положення об'єктів. Для розглянутої конфігурації розташування Bluetooth beacon точність визначення координат збільшилась більш ніж у 5 разів, та майже досягає нижньої границі Рао-Крамера.

5. Проведено експериментальне дослідження розробленого алгоритму з використанням мікрокомп'ютерів RaspberryPi, що виконували функціонал Bluetooth маяків. Отримані результати СКВ похибки визначення положення об'єктів відрізняються від результатів статистичного моделювання в два рази, причиною чого є перевідбиття та накладання

сигналів маяків. Для усунення даної проблеми необхідний опис більш складної моделі поширення сигналу, яка враховує перевідбиття сигналів.



## Література

1. Генике А. А., Побединский Г. Г. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии. — М. : Картгеоцентр, 2004. — 355 с.
2. Alshami I. H., Ahmad N. A., Sahibuddin S. Dynamic WLAN Fingerprinting RadioMap for Adapted Indoor Positioning Model // Springer International Publishing Switzerland. — 2015.
3. Pritt N. Indoor location with Wi-Fi fingerprinting // 2013 IEEE Applied Imagery Pattern Recognition Workshop (AIPR). — Окт. 2013. — С. 1—8.
4. Курошев Г. Д. Космическая геодезия и глобальные системы позиционирования. — СПб. : Изд-во С.-Петерб. ун-та., 2011. — 184 с.
5. Bajers F. Inertial Navigation System. — Denmark, Aalborg University, 2008. — 122 pp
6. Назаров А. С. Фотограмметрия. — Минск : ТетраСистемс, 2006. — 400 с.
7. Курошев Г. Д. Геодезия и география. — СПб : Изд-во С.-Петерб. ун-та., 1999. — С. 372.
8. Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics. GPS Accuracy. — URL: <http://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/>.
9. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения. История развития ГЛОНАСС. — URL: <https://www.glonass-iac.ru/guide/>.
10. European Space Agency. What is Galileo? — URL: [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/The\\_future\\_-\\_Galileo/What\\_is\\_Galileo](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_-_Galileo/What_is_Galileo).
11. Beidou Navigation Satellite System. Development Process. — URL: <http://www.beidou.gov.cn/2012/12/14/20121214e14a946961514cce98ab04d876258343.html>.

12. Намиот Д. Е. Использование двумерных штрих-кодов для создания системы позиционирования и навигации в помещении // Прикладная информатика. — 2013. — С. 31—39.
13. Indoor positioning system using geomagnetic anomalies for smartphones / S.-E. Kim // — 2012.
14. Using Wi-Fi/magnetometers for indoor location and personal navigation / Y. Li // — 2015.
15. Sharma R. R., Raunak, Sanganal A. Li-Fi Technology. Transmission of data through light.
16. Yoshino M., Haruyama S., Nakagawa M. High-accuracy positioning system using visible LED lights and image sensor // — 2008. — С. 439—442.
17. Indoor three-dimensional location estimation based on LED visible light communication / S.-H. Yang [и др.] // Electronics Letters. — 2013. — Т. 49, № 1. — С. 54—56.
18. A Reliable and accurate indoor localization method using phone inertial sensors / F. Li [и др.] // — 2012. — С. 421—430.
19. Harle R. A survey of indoor inertial positioning systems for pedestrians // IEEE Communications Surveys and Tutorials. — 2013. — Т. 15, № 3. — С. 1281—1293.
20. Performance and limits of KNN-based positioning methods for GSM networks over leaky feeder in underground tunnels / F. Pereira [и др.] // Journal of Location Based Services. — 2012. — Т. 6, № 2. — С. 117—133.
21. Namiot D. On indoor Positioning // International Journal of Open Information Technologies. — 2015. — Т. 3.
22. Mahamud M. A., Chowdhury M. Indoor Location System with Wi-Fi and Alternative Cellular Network Signal // International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering. — 2015. — Т. 10, № 3. — С. 59—70.
23. A Real-Time Location-Based Services System Using WiFi Fingerprinting Algorithm for Safety Risk Assessment of Workers in Tunnels / P. Lin [и др.] // Mathematical Problems in Engineering. — Beijing, 2014. — С. 1—10.

24. Namiot D. Context-Aware Browsing – A Practical Approach // 2012 Sixth International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies. — Сент. 2012. — С. 18—23.
25. Pahlavan K., Li X., Makela J. P. Indoor geolocation science and technology // IEEE Communications Magazine. — 2002. — Февр. — Т. 40, № 2. — С. 112—118.
26. Товкач І.О. Аналіз точностних характеристик алгоритма калмановської фільтрації параметрів руху БПЛА по даним сенсорної мережі на основі методу RSS /І.О.Товкач, С.Я.Жук // Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні по-ля, сигнали та системи». Київ, 20 — 26 березня 2017 р.: матеріали конференції — Київ, 2017. — С. 47 — 49.
27. Shan, Gaoyang; Roh, Byeong-hee (2020). Performance Model for Advanced Neighbor Discovery Process in Bluetooth Low Energy 5.0-enabled IoT Networks. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1–1. doi:10.1109/TIE.2019.2962401
28. Hashim, Ahmed A.; Rasheed, Mohammad M.; Abdullah, Sarah Ali. Analysis of bluetooth low energy-based indoor localization system using machine learning algorithms. *Journal of Engineering Science and Technology*, 2021, 16.4: 2816-2824.
29. An ibeacon primer for indoor localization / P. Martin //. — 2014. — С. 190 — 191.
30. Holm S. Ultrasound positioning based on time-of-flight and signal strength //. — 2012.
31. Kupper, A. Location-Based Services / A. Kupper — John Wiley & Sons Ltd, 2005. — 365 p.
32. Аверин, И.М. Позиционирование пользователей с использованием инфраструктуры локальных беспроводных сетей / И.М. Аверин, В.Ю. Семенов // IV Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» (ИРЭ РАН, 29 ноября – 3 декабря 2010 г.). — М., 2010. — С. 475–479.

33. Kolodziej, K.W. Local Positioning Systems: LBS Applications and Services / K.W. Kolodziej, J. Hjelm — CRC Press, 2006. — 445 p.
34. Bahl, P. RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System / P. Bahl, V. Padmanabhan // IEEE INFOCOM, Tel-Aviv, Israel, Mar. 2000. — P. 775–784.
35. Kolodziej, K.W. Local Positioning Systems: LBS Applications and Services / K.W. Kolodziej, J. Hjelm — CRC Press, 2006. — 445 p.
36. Bensky, A. Wireless Positioning Technologies and Applications / A. Bensky — Artech House, 2008. — 297 p.
37. Минахметов, Р.М. Интеграция алгоритма кластеризации Fuzzy c-Means в PostgreSQL / Р.М. Минахметов // Труды Института системного программирования РАН. — 2011. — Т. 21. — С. 263–276.
38. Дудник, В.В. Алгоритмы определения положения в локальных беспроводных сетях / В.В. Дудник, А.Н. Алфимцев // Молодежный научно-технический вестник МГТУ им. Баумана. — 2012. — № 4. — С. 20–26.
39. A Friis-Based Calibrated Model for WiFi Terminals Positioning / F. Lassabe, O. Baala, P. Canalda et al. // Proceedings of IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks — Jun. 2005. — P. 382–387.
40. Improving Indoor Positioning Accuracy through a Wi-Fi Handover Algorithm / F. Alsehly, R. Mohd Sabri, Z. Sevak et al. // International Technical Meeting — Sep. 2010. — P. 131–139.

# **ДОДАТОК А**

Тези

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Радіотехнічний факультет

***РТПСАС***      **2021**      ***RTPSAS***

X Міжнародна науково-технічна конференція  
**РАДІОТЕХНІЧНІ ПРОБЛЕМИ, СИГНАЛИ, АПАРАТИ ТА СИСТЕМИ**

Матеріали конференції  
09 – 11 листопада 2021  
Київ, Україна

International  
Scientific and Technical Conference  
**RADIOENGINEERING PROBLEMS, SIGNALS, DEVICES AND SYSTEMS**

Conference Proceeding  
November 09– 11, 2021  
Kyiv, Ukraine

Київ — 2021

УДК 621  
ISSN 2311-4169

**X Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні проблеми, сигнали, апарати та системи». Київ, 09 – 11 листопада 2021 р.: матеріали конференції — Київ, 2021. — 146 с.**

До збірника матеріалів конференції включено тези представлених доповідей, в яких наведені результати досліджень в радіотехнічній та суміжних галузях, за тематикою напрямків роботи секцій: Радіотехнічні системи та мікрохвильова техніка; Інформаційні технології та телекомунікаційні системи; Електроніка, нанотехнології, біомедичні системи, радіовимірювання.

Збірник призначений для науковців та спеціалістів, працюючих в галузі теоретичних досліджень та практичного використання методів і засобів радіотехніки. Збірник буде корисним викладачам, аспірантам та студентам радіотехнічних, телекомунікаційних, радіоелектронних, радіофізичних факультетів вищих навчальних закладів.

#### **Програмний комітет конференції**

*Антипенко Р. В.*, к.т.н., доц., КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна — голова програмного комітету;

*Захарченко О. С.* — відповідальний секретар конференції

#### **Члени програмного комітету**

<i>Бондаренко Ю</i>	PhD, Сіетл, США
<i>Бойко Р.</i>	інж., Ханчжоу Huawei Telecommunications Communications Co. Ltd., Китай
<i>Кураєв О. О.</i>	д.ф.-м.н., проф., Білоруський держ. ун-т інформатики і рад.-ел., Білорусь
<i>Достал Томаш</i>	проф., Прага, Чеська республіка
<i>Дубровка Ф. Ф.</i>	д.т.н., проф., КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна
<i>Дубровка Р. Ф.</i>	PhD, Лондонський ун-т королеви Мері, Великобританія
<i>Жук С. Я.</i>	д.т.н., проф., КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна
<i>Іхсан Джэйджек</i>	Asst. Prof. Dept. of Electrical-Electronics Engineering Istinye University, Стамбул, Туреччина
<i>Зінковський Ю. Ф.</i>	д.т.н., проф., КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна
<i>Калюжний О. Я</i>	д.ф.-м.н., проф., КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна
<i>Карташов В. М.</i>	д.т.н., проф., Харківський нац. ун-т., Україна
<i>Кичак В. М.</i>	д.т.н., проф., Вінницький нац. техн. ун-т, Україна
<i>Мартинюк В. В.</i>	д.т.н., проф., Хмельницький нац. ун-т, Україна
<i>Манойлов В. П.</i>	д.т.н., проф. Житомирський нац. техн. ун-т, Україна
<i>Могильний С. Б.</i>	к.т.н., доц., КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна
<i>Найденко В. І.</i>	д.ф.-м.н., проф., КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна
<i>Нелін Є. А.</i>	д.т.н., проф., КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна
<i>Прокопенко І. Г.</i>	д.т.н., проф., Нац. авіаційний ун-т, Україна
<i>Прудіус І. Н.</i>	д.т.н., проф., Нац. ун-т України «Львівська політехніка», Україна
<i>Райда Збінек</i>	проф., Брно, Чеська республіка
<i>Солошенко Н. В.</i>	інж. з польових застосувань, Würth Elektronik GmbH & Co. KG, Німеччина
<i>Цвєлих І. С.</i>	к.т.н., інженер Huawei Technologies Infineon Technologies AG, Мюнхен, Німеччина
<i>Чміль В. М.</i>	к.т.н., гол. правл., ПАТ "Науково-виробниче підприємство "Сатурн", Україна
<i>Шайко-Шайковський О. Г.</i>	проф., ЧНУ ім. Юрія Федьковича, Україна
<i>Яненко О. П.</i>	д.т.н., проф., КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна

#### **Організаційний комітет конференції**

*Мартинюк С. Є.* — к.т.н., доц., голова організаційного комітету;

#### **Члени організаційного комітету:**

Лащевська Н. О., Сушко І. О., Головня В. М.

#### **Розроблення та супроводження сайту конференції: Захарченко О. С.**

**Адреса оргкомітету:** Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2100, радіотехнічний факультет, корп. 17, кім. 300, пр-т Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. **Тел.** (+38044) 362-98-51. **e-mail:** [rtpsas@kpi.ua](mailto:rtpsas@kpi.ua) **Сайт:** <http://rtpsas.rtf.kpi.ua>

Рекомендовано до друку рішенням програмного комітету конференції та вченої ради радіотехнічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 10/2021 від 01.11.2021 р.)

UDK 621

ISSN 2311-4169

**X-th International scientific and technical conference «Radioengineering Problems, Signals, Devices and Systems». Kyiv, March, 09 – 11, 2021: conference proceedings — Kyiv: 2021. — 146 p.**

Collection of the conference materials include theses of reports in which the results of research in: Radio Engineering Systems and Microwave Technique; IT and Telecommunication Systems; Electronics, Nanotechnologies, Biomedical Electronic Systems, Radio Measurements..

Collection of is designed for a wide range of scientists and specialists, working in the field of theoretical research and practical application of methods and means of radioengineering. The collection will be useful to teachers, graduate students and students of radioengineering, telecommunication, electronic, radio-physical faculties of higher educational institutions.

**Conference Program Committee:**

**Antypenko R. V.**, Cand. Of Sci (Techn.), prof., Igor Sikorsky KPI, Ukraine — Chairman of Program Committee

**Program Committee Members:**

**Bondarenko Y.** PhD, Seattle, USA  
**Boyko R.** Engineer B, Huawei Technologies / Hangzhou Huawei Telecommunications Communications Co. Ltd., Hangzhou, China  
**Dubrovka F. F.** Doc. Of Sci (Techn.), prof., Igor Sikorsky KPI, Ukraine  
**Dubrovka R. F.** PhD, Queen Mary University of London, London, Great Britain  
**Zbynek Raida** Professor, Brno, Czech Republic  
**Zinkovsky Y. F.** Doc. Of Sci (Techn.), prof., Igor Sikorsky KPI, Ukraine  
**Zhuk S. Y.** Doc. Of Sci (Techn.), prof., Igor Sikorsky KPI, Ukraine  
**Ihsan Cicek** PhD, Asst. Prof. Dept. of Electrical-Electronics Engineering Istinye University, Istanbul Turkey  
**Kalyuzhnyi O. Ya.** Doc. Of Sci (Physics-Math.), prof., Igor Sikorsky KPI, Ukraine  
**Kartashov V. M.** Doc. Of Sci (Techn.), prof., Kharkiv National Univ. of Radio Electronics, Ukraine  
**Kryzhanivsky V. G.** Doc. Of Sci (Techn.), prof., Donetsk National University, Ukraine  
**Kychak V. M.** Doc. Of Sci (Techn.), prof., Vinnytsia National Techn. Univ., Ukraine  
**Kuraev O. O.** Doc. Of Sci (Physics-Math.), prof., Minsk, Belarus  
**Manoylov V. P.** Doc. Of Sci (Techn.), prof., Zhytomyr National Univ. of Technology, Ukraine  
**Martyniuk V. V.** Doc. Of Sci (Techn.), prof., Khmelnytskyi National Univ., Ukraine  
**Mogylnyi S. B.** Cand. Of Sci (Techn.), Assoc. Prof., Igor Sikorsky KPI, Ukraine  
**Naidenko V. I.** Doc. Of Sci (Physics-Math.), prof., Igor Sikorsky KPI, Ukraine  
**Nelin Ye. A.** Doc. Of Sci (Techn.), prof., Igor Sikorsky KPI, Ukraine  
**Pravda V. I.** Cand. Of Sci (Techn.), prof., Igor Sikorsky KPI, Ukraine  
**Prokopenko I. H.** Doc. Of Sci (Techn.), prof., Nat. aviation Univ., Ukraine  
**Prudius I. N.** Doc. Of Sci (Techn.), prof., Nat. Univ. of Ukraine «Lviv Polytechnic», Ukraine  
**Chmil V. M.** Cand. Of Sci (Techn.), NVP «Saturn», Ukraine  
**Soloshenko N. V.** Field Applications Engineer, Würth Elektronik GmbH & Co. KG, Germany  
**Shaiko-Shaikovskyi O. H.** prof., Yuri Fedkovych Cher. Nat. Univ., Ukraine  
**Tomash Dostal** Professor, Prague, Czech Republic  
**Tsvelyh I. S.** PhD, Infineon Technologies AG, Munich, Germany  
**Yanenko O. P.** Doc. Of Sci (Techn.), prof., Igor Sikorsky KPI, Ukraine

**Organize Committee conference:**

**Martyniuk S.** — Chairman of the Organizing Committee;

**Organize Committee Members:**

Lashchevska N., Zakharchenko O., Sushko I., Holovnia V.

**Produce and technical support of the conference site: O. Zakharchenko**

**Organize Committee address:** 2100, radioengineering department. National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Peremogy Str., 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

**Tel.** (+38044)454-94-23. **E-mail:** rtpsas@kpi.ua **Site:** <http://rtpsas.rtf.kpi.ua>

It is recommended to seal by the decision of the programme committee and Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute Radioengineering Department Scientific Council (Record № 10/2021 of 01.11.2021).



**ЗМІСТ**

<b>Секція 1. Радіотехнічні системи та мікрохвильова техніка. ....</b>	<b>7</b>
Використання методів обчислення оптичного потоку для вирішення задач детекції та супроводження малогабаритних цілей. Соколов К. А. ....	8
Оптимізація 90° коаксіально-мікросмушкового переходу на основі коаксіального роз'єму типу SMP. Роман Л. О., Василенко Д. О., Мартинюк С. Є. ....	11
Моделювання широкосмугових смужкових антен ku-діапазону для супутникового зв'язку. Гергіль Є. Є., Сушко О. Ю. ....	14
Проблемні питання проведення налагодження та випробувань складних антенних систем. Волошин О. П., Ліпатов В. П., Марков В. І., Остапенко Д. А. ....	17
Врахування електромагнітного зв'язку в еквівалентній схемі мікросмушко-щілинного переходу. Ткаченко К. О., Дубровка Ф. Ф. ....	20
Вплив хвильових опорів чвертьхвильових шлейфів на характеристики мікросмушко-щілинного переходу. Ткаченко К. О., Дубровка Ф. Ф. ....	23
Система портативних бездротових світлофорів для контролю трафіку на дорогах з ускладненням руху. Красницький М. О., Мирончук О. Ю. ....	26
Програмне забезпечення для моделювання антен. Касапов Е. В., Марков В. І., Остапенко Д. А. ....	29
Дослідження і проектування апаратних операцій порівняння двійкових чисел. Грига В. М., Мельничук С. І., Мануляк І. З. ....	32
Adjustable guide filtering device for ku-band range for radioelectronic systems. Dmytrenko V. Y., Demchenko I. V., Kornieva O. A., Yelahina N. S., Piltyay S. I., Bulashenko A. V. ....	35
Iris waveguide phase shifter. Shtyk T. V., Savenchuk T. V., Kornieva O. A., Piltyay S. I., Bulashenko A. V. ....	38
Polarization converter based on a rectangular waveguide with a stepped longitudinal conducting plate. S. I. Piltyay, V. V. Shuliak, A. V. Bulashenko, O. V. Bykovskiy, O. A. Kornieva, A. P. Saranchuk. ....	41
Компактний ультраширокосмуговий опромінювач дзеркальної антени l-діапазону на основі решітки з модифікованих <i>bow-tie</i> елементів. Саратов Є. М., Дубровка Ф. Ф. ....	44

---

<b>Секція 2. Інформаційні технології та телекомунікаційні системи.....</b>	<b>47</b>
Огляд методів виявлення і локалізації_Сокольський С. О., Мовчанюк А. В. ....	48
Особливості поєднання raid-масивів з файловою системою WAFL. Логвиненко Б. Д., Войцех С. І.....	51
Швидке і ефективно поліпшення якості зображення за допомогою згорткової нейронної мережі. Лащевська Н. О., Недзельський О. Ю. ....	54
Порівняльна характеристика аналогової та цифрової телефонії. Павленко Є. В. ....	57
Контроллер мікроклімату для тераріумів. Бруско А. В., Мирончук О. Ю.	60
Модифікований алгоритм цифрової обробки сигналів в радіолокаційній систем виявлення малорозмірних цілей. Чернишов Д. Є. Чмельов В. О....	63
Метод детектування DVB-S2/S2X сигналів. Круглик О. С., Семенов В. Ю. ....	66
Алгоритм супроводження точкової цілі з використанням моделі виявлення на основі патч-зображення. Маленчик Т. В., Неуймін О. С., Жук С. Я. ....	69
Розрахунок дальності виявлення БПЛА FMCW радіолокатором на базі програмно визначеного радіо BLADERF 2.0. Неуймін О.С. Маленчик Т.В. ....	72
Electronic simulator of signals derived from scintillation detectors in spectrometric identification of high-energy charged particles. Yezerskyi N. V., Movchaniuk A. V., Dudnik O. V.....	75
An overview of necessary technologies for energy efficient and environmental multimedia 5G networks. Lavrinenko Vladyslav .....	78
Аналіз алгоритму позиціонування об'єкта на основі технології BLUETOOTH BEACON. Косовець І. А., Товкач І. О.....	81
Розумний пристрій виявлення диму. Кот М. Г., Мирончук О. Ю. ....	84
Алгоритми цифрової обробки радіолокаційних сигналів на основі ортогональних поліномів. Гуліч Є. Д., Чмельов В. О. ....	87
Detection of moving objects in video sequences. Omelianenko B. A., Vyshnevyyi S. V. ....	90
Синтез пристроїв управління лінійними процесами в каналах радіозв'язку. Міщенко В. О., Степанов М. М. ....	93

<b>Секція 3. Електроніка, нанотехнології, біомедичні системи, радіовимірювання. ....</b>	<b>98</b>
Датчик протікання води. Тарасюк А. О., Зінгер Я. Л. ....	99
Детектор прямої послідовності синусоїдних напруг в системі координат методу двох ватметрів. Артеменко М. Ю., Батрак Л. М., Кутафін Ю. В. ....	102
Специфіка моделювання тензорезистивного сенсор в програмному середовищі COMSOL MULTIPHYSICS. Гончарук А. В., Савченко І. О., Адаменко Ю. Ф. ....	105
Аналіз методик розрахунку індуктивності одиночного прямого провідника та кругового витка зі струмом. Середін А. П., Мовчанюк А. В., Каращук Я. Ф. ....	108
Зворотногоходовий перетворювач PFC з GaN-транзистором та цифровим керуванням. Арсенюк Д. О., Зіньковський Ю.Ф. ....	111
Особливості проектування генераторів ударного збудження для п'єзоперетворювачів. Мовчанюк А. В., Гришко І. А., Шульга А. В., Фесич В. П. ....	114
Електромеханічна зимова вудка. Попсуй В. І. ....	117
Мостова схема формування сигналу зворотного зв'язку ультразвукового генератора для живлення п'єзоперетворювача. Малюкін О. В., Попсуй В. І. ....	120
Персональний двоканальний пристрій для реєстрації оксипульсових сигналів. Зіменко Д. О., Матрофайло Н. І., Гусєва О. В. ....	123
Методика розрахунку траєкторії руху і характеристик зображення малорозмірного біла в фокальній площині відеокамери. Герасименко А. О., Крот Ю. Ю., Жук С. Я. ....	126
Портативна метеостанція. Вергелес Т. А., Мирончук О. Ю. ....	129
Digital programmable instrumentation amplifier. Y. Burkovskiy, U. Zinkovskiy ....	132
Методика статистичної обробки даних при лазерному скануванні крові. Головня В. М., Зіньковський Ю. Ф. ....	135
Отпoeлектронні прилади для статичного та динамічного спекл-зображення клітин крові. Стативка І. Д., Богомоллов М. Ф. ....	138
Застосування особливості хиральності глюкози при неінвазивних оптичних вимірюваннях. Дідковський Т. М., Богомоллов М. Ф. ....	141
АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК АВТОРІВ. ....	144

**АНАЛІЗ АЛГОРИТМУ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ОБ'ЄКТА НА ОСНОВІ  
ТЕХНОЛОГІЇ BLUETOOTH BEACON**

*Косовець І. А., магістрант; Товкач І. О., к.т.н.;*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний  
інститут», м. Київ, Україна*

На сьогоднішній день позиціонування є необхідним в таких сферах як: маркетинг, транспортна сфера, промисловість та охорона здоров'я [1]. В умовах коли GPS та інші супутникові системи позиціонування мають велику похибку або взагалі не працюють, наприклад у приміщенні або під землею, позиціонування можна виконати за допомогою використання технологій WiFi та Bluetooth.

Технологія Bluetooth Low Energy(BLE) [1] має такі переваги як мале енергоспоживання та підтримка всіма розробниками персональної електроніки. На основі цієї технології побудовано пристрої Bluetooth beacon (маяки), які використовуються для розсилання інформації та позиціонування мобільних об'єктів.

Оскільки рішення що вже існують не задовольняють вимогам точності, аналіз та розробка алгоритмів позиціонування на основі пристроїв Bluetooth beacon є актуальною задачею.

При визначенні положення об'єкту за допомогою Bluetooth beacon використовуються виміряні значення потужності прийнятих сигналів (RSS - receive signal strength). Потужність визначається за моделлю поширення, яка враховує тільки загасання сигналу та має вигляд[2]:

$$P_i = P_0 - 10 \cdot a \cdot \lg\left(\frac{R_i}{R_0}\right) + v_i, \quad (1)$$

де  $P_i$  — виміряна об'єктом потужність, отримана від  $i$ -того маяка, що знаходиться на відстані  $R_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $n$  — кількість Bluetooth маяків;  $P_0$  — потужність сигналу на відомій відстані  $R_0$ ;  $a$  — коефіцієнт загасання в середовищі;  $v_i$  — помилка вимірювання потужності сигналу.

Розрахунок положення об'єкта виконується за допомогою розв'язка системи рівнянь методом найменших квадратів (МНК) в векторному виді:

$$\omega = 0.5 \left( A^T A \right)^{-1} A^T B, \quad (2)$$

де  $\omega^T = (x, y, R)$  — вектор, що включає оцінки координат джерела радіовипромінювання;

$$A = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & -0.5 \\ x_2 & y_2 & -0.5 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_i & y_i & -0.5 \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} x_1^2 + y_1^2 - 10 \frac{P_0 - P_1}{5 \cdot a} \\ x_2^2 + y_2^2 - 10 \frac{P_0 - P_2}{5 \cdot a} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_i^2 + y_i^2 - 10 \frac{P_0 - P_i}{5 \cdot a} \end{pmatrix};$$

$x_i, y_i$  — положення  $i$ -того маяка в заданій сітці координат;  $x, y$  — координати що визначаються.

Моделювання алгоритму на основі RSS-вимірювань (1) виконано indoor (в приміщенні), яке має такі параметри: довжина — 100 метрів; ширина — 3 метри. Конфігурація розташування Bluetooth beacon:  $B_1(0; 0)$ ,  $B_2(12.5; 3)$ ,  $B_3(25; 0)$ ,  $B_4(37.5; 3)$ ,  $B_5(50; 0)$ ,  $B_6(62.5; 3)$ ,  $B_7(75; 0)$ ,  $B_8(87.5; 3)$ ,  $B_9(100; 0)$ . Місцеположення об'єкта задається з проміжком 1 метр, впродовж всього приміщення (рис. 1).

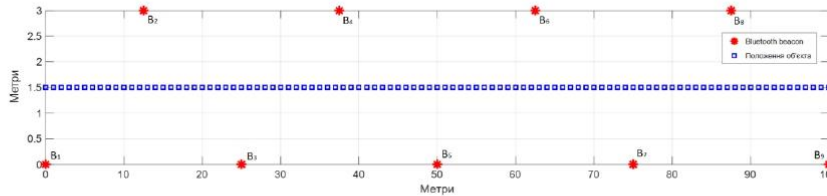


Рисунок 1. Конфігурація розташування Bluetooth beacon та місцеположення об'єкта

Похибка вимірювання потужності маяками  $\sigma = 0.5$  дБм. В якості показника ефективності використано кругове середнє квадратичне відхилення (СКВ)  $\hat{\sigma} = \sqrt{\text{tr}(\hat{P})}$ .

Фактичне кругове СКВ  $\hat{\sigma}^{MK}$  (крива 1) похибки оцінки положення об'єкта, отримане методом Монте-Карло при розрахунку з використанням всіх датчиків, яке зображено на рис. 2. СКВ  $\hat{\sigma}^{MK}$  похибки оцінки положення об'єкта, приймає значення в межах від 15 до 70 метрів.

Також розраховано СКВ  $\hat{\sigma}^{MK}$  (крива 2) похибки оцінки положення об'єкта, використовуючи маяки, прийнята потужність яких  $P_i > -75$  дБм, що відповідає найближчим 3-4 маякам до положення об'єкта, що визначається. Таким чином використовуючи лише маяки з прийнятим сигналом, який задовольняє заданому критерію потужності, дозволило зменшити СКВ похибки оцінки положення об'єкта більше ніж у три рази. Для зменшення СКВ похибки оцінки положення об'єкта на початку та в кінці приміщення, необхідно в крайніх точках додати Bluetooth beacon.

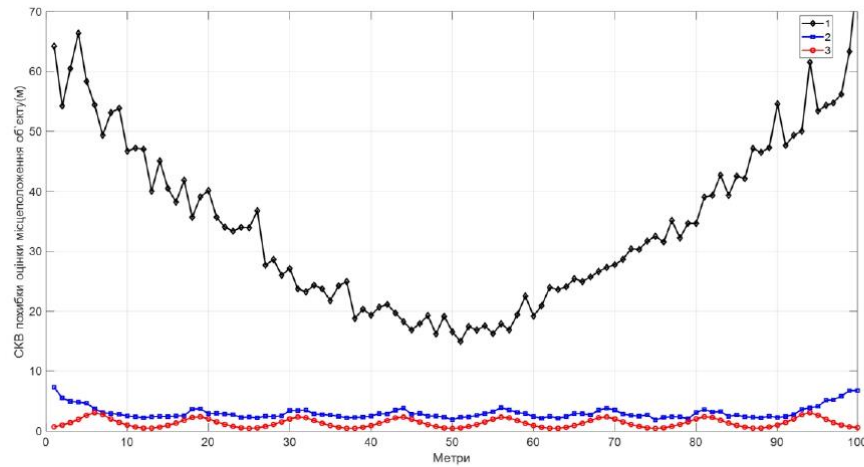


Рисунок. 2. СКВ похибки оцінки положення об'єкта

Також на рис. 2 показано СКВ  $\hat{\sigma}_{НГРК}$ , яке відповідає нижній границі Рао-Крамера (НГРК), яка характеризує потенційно можливу точність визначення координат об'єкта (крива 3).

Для розглянутого алгоритму на основі RSS-вимірювань, СКВ похибки оцінки положення об'єкта не досягає НГРК на 30-35%, тому удосконалення алгоритму визначення положення об'єкта є актуальною науковою задачею.

#### Перелік посилань

1. Hashim, Ahmed A.; Rasheed, Mohammad M.; Abdullah, Sarah Ali. Analysis of blue-tooth low energy-based indoor localization system using machine learning algorithms. *Journal of Engineering Science and Technology*, 2021, 16.4: 2816-2824.
2. Товкач І.О. Аналіз точностних характеристик алгоритма калмановської фільтрації параметрів руху БПЛА по даним сенсорної мережі на основі методу RSS /І.О.Товкач, С.Я.Жук // Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». Київ, 20 — 26 березня 2017 р.: матеріали конференції — Київ, 2017. — С. 47 — 49.

#### Анотація

Проведено аналіз ефективності визначення положення об'єкта в приміщенні на основі RSS-вимірювань, з використанням алгоритму трилатерації. Отримані СКВ похибки оцінки положення об'єкта порівняні з нижньою границею Рао-Крамера та досліджено вплив кількості маяків що використовується для розрахунку.

**Ключові слова:** Bluetooth beacon, RSS-вимірювання, метод найменших квадратів.

#### Abstract

An analysis of the effectiveness of determining the position of the object in the room on the basis of RSS-measurements, using a trilateration algorithm. The SLE obtained errors in estimating the position of the object are compared with the lower Rao-Cramer limit and the influence of the number of beacons used for the calculation is investigated.

**Keywords:** Bluetooth beacon, RSS measurement, least squares method.

# **ДОДАТОК Б**

Лістинг коду сайту з розрахунком

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
<head>
  <meta charset="UTF-8">
  <title>Title</title>
</head>
<body style="font-size: 20px;">

<div >
  Рівень RSS: <span id="RSS"></span>
</div>
<div >
  Відстань розрахована за алгоритмом: <span id="DIS"></span>
</div>
<div >
  Відстань розрахована маяком: <span id="IDIS"></span>
</div>
<div >
  Координати: <span id="POS"></span>
</div>

<script src="https://cdn.socket.io/4.3.2/socket.io.min.js"
  integrity="sha384-
KAZ4DjNhLChOB/hxXuKqhMLYvx3b5MIT55xPEiNmREKRzeEm+RVPItnAn0ajQNs"
  crossorigin="anonymous"></script>

<script src="https://cdnjs.cloudflare.com/ajax/libs/mathjs/10.0.0/math.js
"></script>

<script>

  RSS = document.getElementById('RSS');
  DIS = document.getElementById('DIS');
  IDIS = document.getElementById('IDIS');
  POS = document.getElementById('POS');
```



```

var socket = io('http://beacon.polidar.in.ua:3000');

var d0 = 1;
var p0 = -54;
var a = 2;

var P_B=[[0.85,-1.63],[0.6,2.81],[-2.2,0.48]];
var A_help=[];
P_B.forEach((val, key) => {
  A_help.push([val[0],val[1],-0.5])
});
var A=math.matrix(A_help);
console.log(A);

socket.on('chat message', function (msg) {
  console.log(JSON.parse(msg));
  var mes = JSON.parse(msg).beacons;

  var B_help=[];
  var dis_b=[];
  var dis_d=[];
  var Rss_b=[];
  mes.forEach((val, key) => {
    var beacon_minor = val.beacon_data.minor;
    var beacon_rss = val.rssi;
    var beacon_distance = val.distance;
    console.log(beacon_minor, beacon_rss, beacon_distance)
    //  $d0 * 10^{((P0 - Pz(i)) / (10 * n))}$ ;
    var D = d0 * Math.pow(10, ((p0 - beacon_rss) / (10 * a)));
    dis_b.push(beacon_distance.toFixed(2));
    dis_d.push(D.toFixed(2));
    Rss_b.push(beacon_rss.toFixed(2));
    console.log('distance', D);
  });
});

```

```

B_help.push(Math.pow(P_B[parseInt(beacon_minor)][0],2)+Math.pow(P_B[parseInt(beacon_m
inor)][1],2)-Math.pow(D,2))
    })

    var B=math.matrix(B_help);
    var
P=math.multiply(0.5,math.multiply(math.multiply(math.inv(math.multiply(math.transpose(A),A
)),math.transpose(A)),B));
    console.log(P._data);
    POS.innerHTML=P._data.toString();
    RSS.innerHTML = Rss_b.toString();
    DIS.innerHTML = dis_d.toString();
    IDIS.innerHTML = dis_b.toString();
    });
</script>
</body>
</html>

```